شون كارول

أشكال لا نهائيّة غاية في الجمال

علم الإيفوديفو الجديد وصناعة مملكة الحيوان

ترجمة

عبد الله المعمري   حمد الغيثي

نبذة عن المؤلِّف:

شون بي كارول، بروفيسور الأحياء الجزيئية، والجينات، وعلم الوراثة الطبي في جامعة وسكُسون الأمريكية وباحث رئيسي في مركز هوارد هيوز الطبي. يشغل منذ العام 2010 منصب نائب رئيس مركز هوارد هيوز الطبي لتدريس العلوم.

يعتبر كارول أحد روّاد علم النموّ التطوّري (الإيفوديفو) عبر دراسته لنمو جنين ذبابة الفاكهة. وله أكثر من 100 بحث علمي منشور في دوريات علمية محكمة حول تطور الحيوانات.

نبذة عن المترجمين:

عبد الله بن حمد بن سعيد المعمري كاتب ومهندس من عُمان. درس الهندسة الميكانيكية والصناعية في جامعة السلطان قابوس، وعمل مهندساً في عدة جهات، ومترجماً في وزارة التربية والتعليم العمانية.

حاز المعمري على جوائز وشهادات تقديرية ثقافية عديدة وله العديد من المقالات. صدر له:

«صهيل فرس حروري»: مجموعة شعرية.- بيروت: مؤسسة الانتشار العربي، 2005.

«سفر المنظومات»: دراسة تحليلية تاريخية لمنظومة الجوهر والعرض عند الشيخ أبي بكر أحمد بن عبد الله الكندي.- بيروت: مؤسسة الانتشار العربي، 2009.

حمد سنان الغيثي كاتب من عُمان. درس علم الأحياء الجزيئية وعلم الجينات في جامعتي كوينزلاند الأسترالية وبون للعلوم التطبيقية في ألمانيا، ويواصل دراساته العليا في تخصص الكيمياء الحيوية في جامعة جوتنجن الألمانية، ويشرف على «نادي الماجستير» في جامعة جوتنجن منذ مايو 2013.

صدر للغيثي كتاب «حوارات الحارة العُمانية: حوارات إلكترونية في الثقافة العمانية»، عن دار رياض الريّس، 2014.

شون كارول

أشكال لانهائيّة غاية في الجمال

علم الإيفوديفو الجديد وصناعة مملكة الحيوان

ترجمة

عبد الله المعمري حمد الغيثي

مراجعة: عمر سعيد الأيوبي

بيانات الفهرسة أثناء النشر

QH453 .C3712 2016

Carroll, Sean B,

[Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom]

أشكال لا نهائيّة غاية في الجمال : علم الإيفوديفو الجديد وصناعة مملكة الحيوان / تأليف شون كارول ؛ ترجمة عبد الله المعمري، حمد الغيثي. ـ ط. 1. ـ أبوظبي : هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة، كلمة، 2016.

468 ص. ؛ 14 × 21 سم.

ترجمة كتاب : Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom

تدمك : 1–568–17–9948–978

1– النشوء والارتقاء. 2– الوراثة. أ– معمري، عبد الله.
ب– غيثي، حمد. ج– أيوبي، عمر سعيد. د– العنوان.

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الإنجليزي:

Sean B. Carroll

Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom

Published in agreement with the author, c/o BAROR INTERNATIONAL, INC., Armonk, New York, U.S.A.



www.kalima.ae

ص.ب: 2380 أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة، هاتف: 300 6215 2 971+ فاكس: 127 6433 2 971+



هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة
ABU DHABI TOURISM & CULTURE AUTHORITY

أشكال لانهائيّة غاية في الجمال

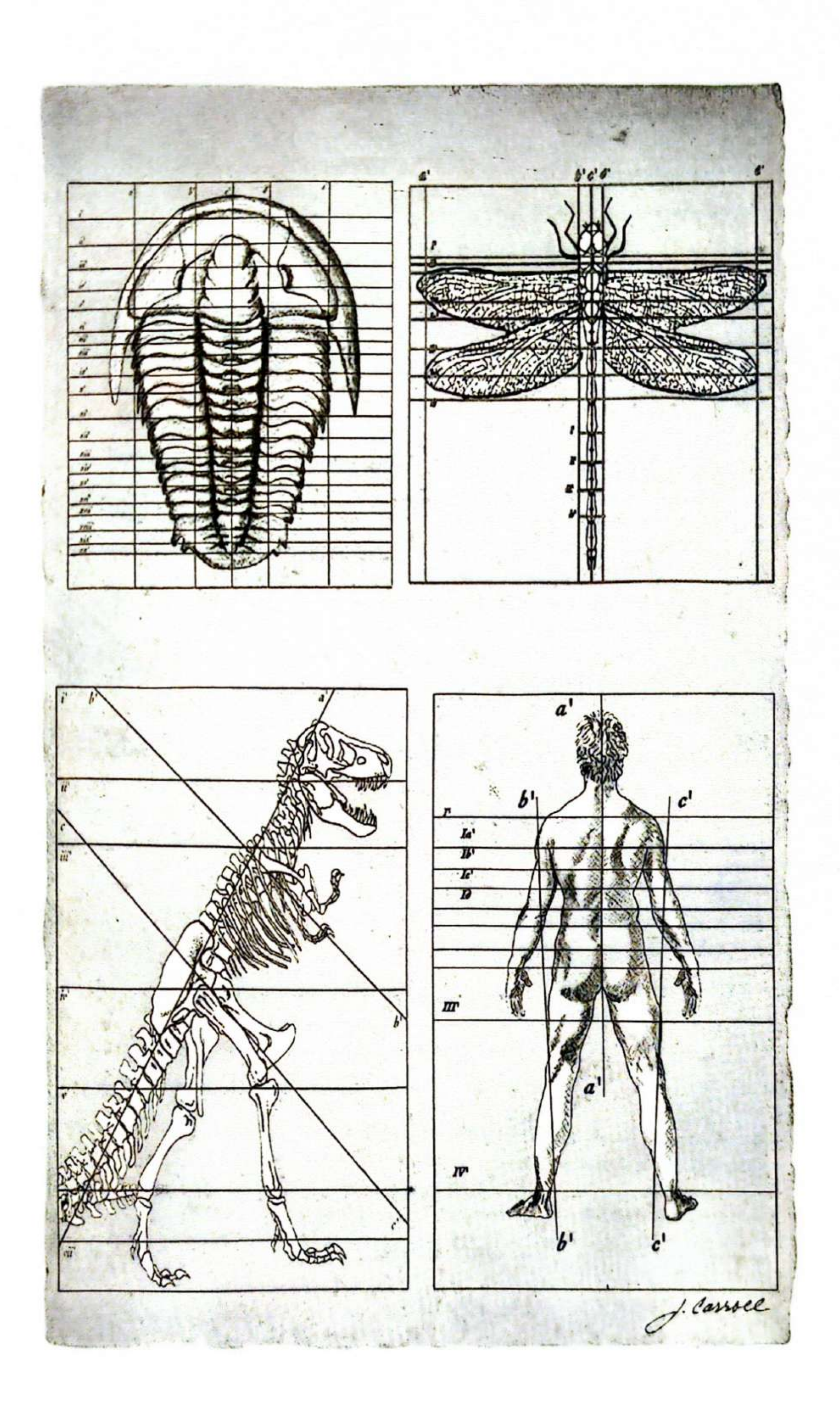
علم الإيفوديفو الجديد وصناعة مملكة الحيوان

مع رسومات وأشكال

جيمي كارول

جوش كليس

ليان أولدز


a'
b'
c'
a'
b'
c'
III'
IV'
J. Carroll

المحتويات

مقدمة الترجمة

يقول علم النمو التطوّري (الإيفوديفو): كان للأفعى عنق وأقدام ذات يوم، ويومها لم تكن تحمل اسم الأفعى، بل اسماً آخر. وكانت أجنحة الدعسوقة الأمامية طرية وشفافة، وهي الآن صلبة وسميكة، ويومها لم تكن تحمل اسم الدعسوقة، بل اسماً آخر. وهكذا كانت الفيلة والأيائل، والقطط والأسماك، هكذا كانت الضواري والأوابد والدببة السوداء والدببة البيضاء.

ويستأنف قائلاً: كانت أرجل الأحصنة وأجنحة الطيور زعانف أسماك في يوم من الأيام، وينطبق ذلك على أصابع الإنسان التي كانت في أسلافه الغابرة مسطحة تثير تيارات الماء في الأعماق.

وقبل أن يسترسل أكثر في الحديث نقاطعه قائلين:

– هذا ما تقوله نظرية التطوّر، نعرف ذلك، ما الذي بحوزتك لإثباتها؟ حفنة من بقايا العظام المتحجرة؟ أم ربما أمثلة حية شاردة هنا وهناك؟!

– بحوزتي ما هو أقوى من ذلك بكثير، علبة صغيرة كلما أعدت صفها وترتيبها ظهر حيوان جديد، أسميتها «عُدّة الأدوات»، هذه الأدوات تتوارثها الحيوانات من الأسلاف إلى الأخلاف، ولها الفضل في نحت جميع الأجسام الحية، إنها – حتى لا أطنب في البلاغة أيها السادة – مجموعة من الجينات والبروتينات موجودة في كل حيوان وطريقة ترتيبها تصنع الفرق بين الفراشة والذبابة، بين الإنسان والجمل، وقد تحوّرت

الجينات وتضاعفت الجينومات إلا أن هذه الأدوات الجينية مازالت متماسكة تحتفظ بسماتها الأولى إلى حدٍّ كبير، فالأداة الصانعة للقلب - الموجودة في هذه العدة - تصنع قلب الإنسان المغلق كما تصنع قلب الحشرة المفتوح، نعم ... قلب الإنسان والحشرة تصنعهما الأداة ذاتها، وذلك ينطبق على الأعين والأطراف وسائر الأجزاء.

هكذا يدخل علم النموّ التطوّري عتبة المسرح مقدماً نظرية التطور بطريقة مختلفة تماماً، وكتاب «أشكال لانهائية غاية في الجمال» يعرض قصة هذا العلم، بأسلوب سهل في متناول الجميع، ويجعل من الحوار أعلاه مفهوماً ومقبولاً ومدججاً بكل التماسك المنطقي الذي تصبو إليه العقول، علم النموّ التطوّري يعضد الاستنتاجات والخلاصات التي توصل إليها علماء الأحافير وعلماء التطوّر بأدلة من عالم الجزيئات العضوية؛ الجينات والبروتينات، والمفاتيح والمتواليات التوقيعية، ويربط عمل الجينات بالنموّ والنموّ بالتطوّر، ويكشف عن تلك التشابهات الخفية التي تجعل من جميع الحيوانات حيواناً واحداً.

تلك هي مهمّة العلم والعلماء؛ أن يبصروا القوانين البسيطة الكامنة وراء الشواش والفوضى، هذا الكتاب سيفتح الأبصار والبصائر على القوانين التي تحكم تحوّلات الحيوان من نوع إلى آخر، وهي قوانين في غاية السحر والبساطة، تماماً كما هي قوانين الفيزياء والفلك، وكما قوبلت قوانين الفلك بالرفض وحاربها القائمون على مصائر العقول حوربت نظرية التطوّر بالتهمة ذاتها، فمن يتبنى نظرية التطوّر منتمٍ إلى حزب الملحدين المتربّصين بالدين، تلك التهمة أدخلت فيما مضى فلكياً عظيماً مثل جاليليو إلى براثن العزلة والإقامة الجبرية، ولم يشفع له تديّنه

وقربه من البابا أوربان الثامن من الاتهام بالبدعة والضلال، وكانت هذه البدعة هي فكرة دوران الأرض حول الشمس!

لقد انقضت الأيام لتجعل من فكرة مركزية الأرض فكرة ساذجة، وقد كانت في ما مضى من أصلب الأفكار وأكثرها بديهية، كيف لا وقد وضعتها عقول جبّارة: أرسطو وبطليموس، ثم صارت ديناً يميّز به الخبيث من الطيب. ثم لما تقدّمت البشرية ونضجت تجاربها، هُجرت هذه الفكرة إلى ما هو أعمق وأدق، والحال ذاته ينطبق على نظرية التطور، لقد استطاع العقل البشري للمرة الأولى أن يفسر أطناناً من الظواهر الأحيائية التي تبدو بلا رابط ويردها إلى نظرية واحدة، للمرة الأولى تبدو القصة متماسكة جداً وبهية التفاصيل والمنعرجات.

لم نترجم هذا الكتاب للانحياز إلى نظرية أو فكرة بصورة عمياء بل لنقدّم موقف العلم الحالي من النظرية، فالعلم يعتبر هذه النظرية ركناً من أركانه شأنها شأن نظرية الانفجار العظيم وقوانين الحركة والجاذبية، العلم هو أرقى أشكال المعرفة البشرية وبالتالي فليس ثمة شك في اتفاقه مع الوحي. ليس بين الدين والعلم أي تعارض، وإن وُجد التعارض فهو إما صنيعة الأهواء والمصالح، أو صنيعة سوء الفهمين؛ فهم الدين وفهم العلم.

حصد كتاب «أشكال لا نهائية غاية في الجمال» عدة جوائز مثل جائزة لوس أنجلوس تايمز للكتاب (العلوم والتكنولوجيا) 2005 وجائزة الأكاديمية الوطنية للاتصالات والعلوم 2006 وجائزة بانتا بجمعية المكتبات في وسكُنسن 2006، ورشحته مجلتا ديسكفري ويو أس توداي ليكون في قوائمها للكتب للعام 2005، أما المؤلف البروفسور شون بي.

كارول عالم الأحياء الجزيئية، والجينات، والجينات الطبية في جامعة وسكُنسن الأمريكية وباحث رئيسي في مركز هوارد هيوز الطبي فرائد من روّاد علم النمو التطوّري، ساهم فيه باكتشافات مهمة وجوهرية، وحاز في العام 2012 وسام بنيامين فرنكلن لإنجازاته في علوم الحياة.

رغم أن الترجمة خيانة كما يقال إلا أننا حرصنا على الالتزام بالأصل ما استطعنا إلى ذلك سبيلاً، وانشغلنا بوضوح المعنى ودقته وسلاسة العبارة وتدفّقها، وقد كان منهجنا هو أن يعمد أحد المترجمين إلى فصل فيعرّبه ثم يدفع به للآخر فلا يرفق بالترجمة بل يتسقط الأخطاء ويبحث عن المثالب، ثم نعقد جلسة للنقاش تستمر ساعات، فإذا رضينا واطمأنت الأنفس دفعنا بالفصل لقارئ آخر لم يطلع على الأصل لنتأكد من وضوح النص العربي وسلاسته، هذا القارئ هو الطبيب والروائي حسين العبري، فله الشكر على ما أبداه من دقة وحزم، لقد ساهمت ملاحظاته ونصائحه في تعديل وتصحيح الكثير.

تجدر الإشارة إلى بعض التنسيقات العامة في الترجمة، لم يترك المؤلف أي هامش في النص الأصلي وإنما جمع استدراكاته في فصل «المراجع والقراءات الإضافية»، بالرغم من ذلك فقد آثرنا تذييل جميع الهوامش بكلمة «المترجمان» حتى لا يلتبس الأمر على القارئ، بالنسبة لأسماء الأعلام والأماكن والمصطلحات فقد أثبتنا الاسم الإنجليزي بين قوسين (...) عند وروده للمرة الأولى، وفعلنا مثله بأسماء الكتب التي لها تراجم عربية إنما من غير أقواس، أما تلك التي لم تترجم بعد فقد وضعنا ترجمة العنوان بين معقوفتين [....]، كما أوردنا أسماء أنواع الكائنات الحية وأجناسها بخط مائل بُغية تمييزها.

وأخيراً إن هذا الكتاب رحلة مليئة بالدهشة والجمال، سترون كيف أن العمليات والأدوات ذاتها التي تنتج فيلاً ضخماً تنتج فراشة أيضاً، العلم يولّد شعوراً عميقاً بالدهشة والجمال، والجمال كما يقول المؤلف: «ليس قضية سطحية في العلم، فأسمى العلوم هو ما تنتجه بشكل متكامل جوانبنا العاطفية والفكرية، أي فصا دماغنا الأيمن (العاطفي أو المبدع) والأيسر (المنطقي). إن أعظم نشوات الاكتشاف العلمي هي ما تجمع الجماليات الحسية والرؤية المفهومية. لاحظ الفيزيائي فيكتور فايسكوبف (وهو عازف بيانو أيضاً) أن (الجميل في العلم، هو ذاته الجميل في بيتهوفن؛ أحداث ضبابية، وفجأة تبصر رابطاً يعبر عن هواجس الإنسان التي تسكن أعماقك، ويصل الأشياء التي كانت دائماً بداخلنا لكنها لم توصل أبداً من قبل)».

المترجمان

توطئة

الثورة # 3

تخبرني أنك تريد ثورةً
حسناً، أنت تعلم
كلنا نودُ تغيير العالم.
تخبرني أنّه تطوّر
حسناً، أنت تعلم
كلنا نودُ تغيير العالم...
تخبرني أنّ عندك الحل الأمثل
حسناً، أنت تعلم
كلنا نودُ رؤية الخطة...

جون لينون (John Lennon) وبول مكارتني (Paul McCartney)
«Revolution 1» (1968)

كتب جون بيرين (Jean Perrin) -الفيزيائي الحائز جائزة نوبل- ذات مرة أن مفتاح أي تقدّم علمي هو مقدرته على «تفسير البنى شديدة التعقيد ظاهرياً بأجزائها البسيطة المضمرة»، وقد اتسمت أكبر ثورتين في علم الأحياء، وهما نظرية التطوّر وعلم الجينات، بمثل هذه الرؤية، إذ فسّر داروِن (Darwin) السجلات الأحفورية التي دوّنت مسيرة الأنواع الحية، والتنوّع الهائل للكائنات الحية، باعتبارها نتيجة لانتخاب طبيعي (Natural Selection) حدث عبر أزمنة مديدة. وفسر علم الأحياء الجزيئية[1] كيف

(1) علم الأحياء الجزيئية (Molecular Biology) هو فرع من علم الأحياء معني بدارسة الأساس الجزيئي للنشاط الأحيائي، وتأثير شكل الجزيئات الحيوية، كالدنا (DNA) والرنا (RNA) =

أن مبادئ توارث الصفات الوراثية في جميع الأنواع[1] مشفّرة في جزيئات الحمض النووي (الدنا)[2] المكوّن فقط من أربعة أجزاء أساسية. ورغم عمق هذه التصوّرات العلمية وقدرتها على شرح أصل *الأشكال* شديدة التعقيد -بدءاً بأجسام ثلاثيات الفصوص (Trilobites) البائدة إلى مناقير عصافير جالاباجوس- إلا أنها ظلت ناقصة، ولم يقدّم الانتخاب الطبيعي أو الدنا تفسيراً مباشراً لسؤالين مهمين هما: كيف تكوّن شكل[3] الكائن الحي؟ وكيف تطوّرت هذه الأشكال عبر الزمن؟

ظل *النموّ* (Development) أحد أعظم ألغاز علم الأحياء العصيّة على الحل ما يقارب قرنين من الزمان. ويكتسب النموّ أهميته من كونه مفتاحاً لفهم *الشكل* (Form)، فهو تلك العملية التي تتحوّل خلالها بويضة مكوّنة من خلية واحدة إلى حيوان مكوّن من بلايين الخلايا. وللنموّ علاقة وثيقة بالتطوّر لأن الشكل يتغيّر تبعاً لتلك التغيرّات التي تطرأ على الأجنّة. وقد بزغت في العقدين الأخيرين ثورة جديدة في علم الأحياء، فقد كشف التقدّم في علم أحياء النموّ وعلم أحياء النموّ التطوري[4] (يختصر باسم «الإيفوديفو» Evo Devo) الكثير عن الجينات غير المرئية، وبعض قواعدها البسيطة التي تَنْحت شكل الحيوان وترسم

= والبروتينات، في وظيفتها. المترجمان

(1) نوع (Species) (ج. أنواع) هو أحد وحدات تصنيف الكائنات الحية ويشمل الكائنات التي تستطيع التكاثر فيما بينها منتجة ذرية قادرة على التكاثر. المترجمان

(2) الحمض النووي الرايبوزي منقوض الأكسجين (DNA) جزيء، الحامل الرئيسي للصفات الوراثية في الكائنات الحية. يشارك وشقيقه الحمض النووي الرايبوزي (RNA) في نقل المعلومات الوراثية للبروتينات. المترجمان

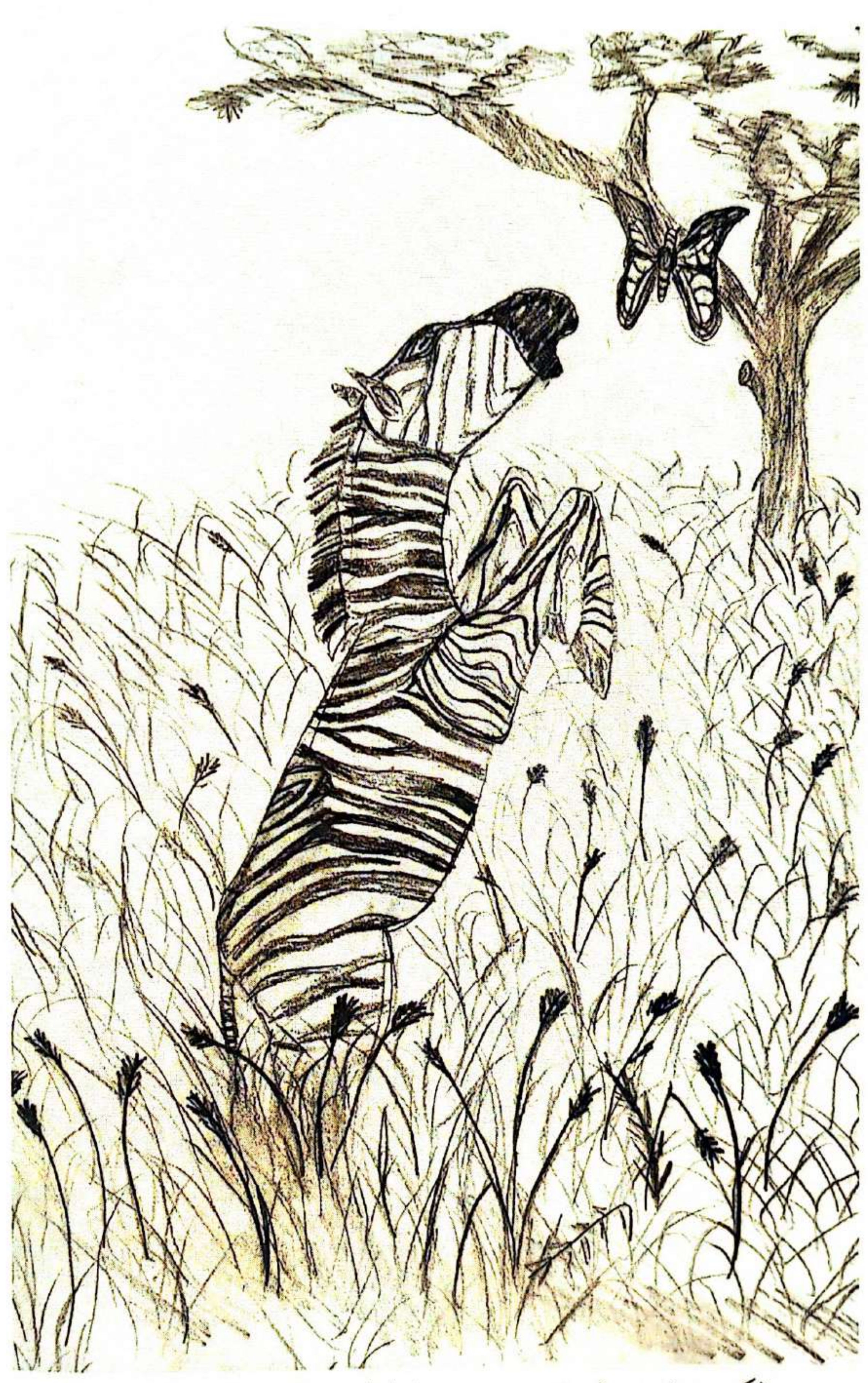
(3) الشكل هو مظهر الحيوان وهيئته وبُنيته، للزرافة مثلاً شكل يختلف عن النمر وهو بدوره يختلف عن النملة، سيرد المصطلح كثيراً وسيغدو مألوفاً جداً كلما تقدمنا في الكتاب. المترجمان

(4) علم أحياء النمو (Developmental Biology) هو فرع علم الأحياء المعني بدراسة المراحل التي يمر بها الكائن الحي منذ التلقيح وحتى الشيخوخة عبر التحكم الوراثي بنشاط الخلايا والأنسجة. علم أحياء النمو التطوري (Evolutionary Developmental Biology) معني بمقارنة عملية النمو في كائنات مختلفة، ليستخلص كيفية «تطور» عملية النمو. المترجمان

تطوّره عبر الزمن. معظم ما تعلمناه كان مذهلاً وغير متوقع، وأعاد بعمق تشكيل فهمنا للكيفية التي تتطوّر بها الأنواع، إذ لم يخطر مثلاً ببال أحد من علماء الأحياء أن الجينات التي تتحكّم في صنع جسم الحشرة وأعضائها الداخلية هي ذاتها الجينات التي تتحكم في صنع أجسامنا.

يحكي هذا الكتاب قصة هذه الثورة الأحيائية الجديدة، ورؤيتها العميقة لكيفية تطور المملكة الحيوانية. أهدف من خلال هذا الكتاب أن أرسم صورة واضحة لعملية تشكّل الحيوان، وأن أوضح كيف أن تغيّرات شتى طرأت على عملية التشكّل هذه قد أدت إلى صياغة أشكال الحيوانات المختلفة، سواء تلك الحيّة المعروفة لدينا الآن أو تلك التي حفظتها لنا سجلات الأحافير.

كتبت الكتاب واضعاً في ذهني عدداً من القراء الافتراضيين، القارئ **الأول** هو ذلك المهتم بالطبيعة والتاريخ الطبيعي، الذي تخلب لبّه حيوانات الغابات المطيرة أو الشعاب المرجانية، أو السافانا أو مكامن الأحافير بحفرياتها المتبقية. سيتضمن الكتاب الكثير عن تكوّن وتطوّر بعض من أكثر الحيوانات روعة، سواء تلك التي عاشت في الماضي أو تلك التي نراها في الحاضر. القارئ **الثاني** يمثل الفيزيائيين والمهندسين وعلماء الكمبيوتر، وغيرهم من المهتمين بفهم جذور التعقيد (origins of complexity)، سيسرد الكتاب لهؤلاء قصة التنوّع الهائل الذي نشأ من تجميع عدد قليل من مكوّنات شائعة. القارئ **الثالث** يمثل الطلاب والمعلمين، لأني أعتقد اعتقاداً متيناً أن الرؤية الجديدة التي يقدمها علم الإيفو ديفو ستمنح عملية التطوّر ألقاً جديداً، وتقدم صورة أكثر إقناعاً وإشراقاً مقارنة بالصورة التي عادة ما تعرض في حلقات الدراسة والنقاش. أما القارئ **الرابع** فهو ذلك الذي يتفكّر في السؤال «من أين جئت؟»؛ فهذا الكتاب يتحدث عن تاريخنا، تاريخ الرحلة التي قطعناها جميعاً من البويضة إلى النضج، وتاريخ الرحلة الطويلة منذ بدء ظهور أول الحيوانات إلى ظهور نوعنا البشري.



رسم لكريستوفر هير (Christopher Herr) البالغ من العمر عشر سنوات من مدرسة إيجل في ماديسون بولاية وسكُنسن (Eagle School. Madison. Wisconsin)

المقدمة:

فراشات،
وحمر وحشية،
وأجنة

تتمشى في الغيمات
في رأسها فراشات وحمر وحشية
وحكايات الجنيّات وأشعة القمر
تلك هي، لا شيء آخر

جيمي هندريكس (Jimi Hendrix)
(1967) "Little Wing»

في زيارتي الأخيرة إلى مدرسة أطفالي الابتدائية، شدّتني رسومات الطلاب التي كانت تزين الممرات. تكرّرت رسومات الحيوانات في العديد من اللوحات، كان الحمار الوحشي أكثر الثدييات ظهوراً في هذه اللوحات، أما الفراشة فكانت الأكثر ظهوراً على الإطلاق، لا يمكن تبرير ذلك بأن الأطفال رسموا ما رأوه خارج النافذة، فقد كنا في فصل

الشتاء بولاية وسكُنسن. لماذا إذًا كل هذه الفراشات والحمر الوحشية؟

أعتقد يقيناً أن هذه الرسومات تعكس ارتباط الأطفال العميق بشكل الحيوان: المظهر، واللون، والنمط. نشعر جميعاً بهذا الارتباط وهو الذي يفسّر تقاطرنا إلى حدائق الحيوان لمشاهدة الحيوانات الغريبة، وتحلّقنا حول أقفاص الفراشات الغريبة، وذهابنا إلى أحواض الكائنات البحرية، وإنفاقنا البلايين على حيواناتنا المستأنسة من كلاب وقطط وطيور وأسماك. إن الدوافع الجمالية تطبع اختيارنا لحيواناتنا المستأنسة. وتفتننا، بل وأحياناً ترهبنا، أشكال الحيوانات غير المألوفة مثل الحبّار العملاق، والديناصورات اللاحمة، والعناكب آكلة الطيور.

إن هذا الارتباط والشغف بأشكال الكائنات الحية حرّك أعظم علماء الطبيعة عبر القرون. ففي تلك الحقبة الباردة والكئيبة في بريطانيا قبل العصر الفيكتوري، قرأ شاب صغير يدعى تشارلز دارون كتاب [سرد شخصي] *Personal Narrative* لألكسندر فون همبولت (Alexander von Humboldt) الذي يقع في ألفي صفحة ويحكي فيه تفاصيل رحلته في أرجاء أمريكا الجنوبية. أَسَرَ الكتابُ دارون، حتى ادّعى لاحقاً أنّ كل ما شغله كان التخطيط للوصول إلى تلك المناطق المدارية التي وصفها همبولت. وعندما سنحت الفرصة التحق دارون برحلة سفينة *بيجل Beagle* المتوجّهة إلى أمريكا الجنوبية عام 1831. وبعد سنوات كتب دارون لهمبولت قائلاً: «تغيّر مسار حياتي بأكمله نتيجة لقراءة هذا السرد الشخصي وإعادة قراءته عدة مرات أيام صباي». حلم إنجليزيان آخران بارتياد الآفاق، لاكتشاف أنواع حيّة جديدة، هما هنري والتر بيتس (Henry Walter Bates)؛ وهو موظف إداري وجامع حشرات شره

في الثانية والعشرين من العمر، وصديقه عالم الطبيعة الذي علّم نفسه بنفسه: ألفرد رسل والاس (Alfred Russell Wallace). لقد اتخذ هذان الشابان قرارهما بعد قراءة كتاب أمريكي يصف رحلة للبرازيل عام 1848. استمرت رحلة دارون خمس سنوات، ومكث بيتس في الأدغال 11 سنة، بينما قضى والاس هناك 14 سنة توزعت على مدار رحلتين. فجّر هؤلاء الحالمون، بناء على آلاف الأنواع التي شاهدوها وجمعوها، أول ثورة في علم الأحياء.

لابد من وجود شيء ما في المناطق الشمالية الباردة يُلهم الناس ليحلموا بالمناطق الاستوائية. لقد نشأت في توليدو (Toledo) بأوهايو (Ohio) محاطاً بالحدائق العامة والمزارع، وعلى مقربة من الشواطئ غير السخيّة لبحيرة إيري (Erie). لكن أحلامي عن الجنّة غذتها المجلات والمسلسل التلفزيوني «مملكة الحيوان» *Animal Kingdom* الذي كان يُبث بالأبيض والأسود. ولذلك كنت محظوظاً بعد عقود حينما تمكّنت (سائحاً لا مغامراً شجاعاً) من رؤية حيوانات السافانا الإفريقية، وأدغال أمريكا الوسطى، والشعاب المرجانية بأستراليا وبيليز (Belize). وقد أثار ما رأيته رهبة أكبر مما كنت أتخيّله في ذهني.

في مراعي كينيا الواسعة تمرّ الزرافات المتفرقة والنعّام والفهود بمحاذاة قطعان الحمر الوحشية والفيلة المنهمكة في التهام العشب. هناك أيضًا الأحصنة المخطّطة، والثدييّات الرمادية العملاقة التي يبلغ طول أنف كل منها 6 أقدام، والقطط الرقطاء التي تجري أسرع من سيارة الجيب. لو لم توجد هذه الكائنات، لاستحال تصديق وجودهما أصلاً.

خلافاً للمراعي الواسعة، تضجّ الغابات المطيرة بكائنات أصغر.

فتحتَ الضوء المتكسر بفعل أغصان الأشجار الكثيفة تتراقص فراشات برّاقة مثل فراشة *الهيليكونيس* (*Heliconius*) ذات اللونين الأصفر والأحمر، أو فراشة مورفو (*Morpho*) ذات اللون الأزرق المعدني. وفي الأسفل قليلاً، على الأرض، ينهمك ضفدع السهم السام المنقط باللونين الأحمر والفيروزي في النقيق، بينما ينغمس النمل قاطع الأوراق الخضراء في مشاريع حصاده الواسعة. تخرج الكائنات المفترسة من أوكارها للصيد ليلاً. لن أنسى أبداً الإثارة التي تملكتني إثر لقاء أفعى السنان القاتلة (fer–de–lance snake) التي يبلغ طولها 6 أقدام في الظلمة الحالكة والهدوء المطلق في مكان تعمره نمور اليغور (jaguars) في أدغال بيليز (شاهدنا الآثار الحديثة فحسب، لكن ذلك قريب بالقدر الكافي).

يضم البحر أشكالاً أكثر غرابة وإدهاشاً، إذ يكفي أن تغطس في المياه الضحلة قرب جزيرة مرجان أسترالية كي تكتشف التنوّع الكبير للأسماك والشعب المرجانية والكائنات الصدفية التي سترطم وجهك وهي تقفز مع موجة عابرة. أضواء النيون، وأجسام مختلفة الأشكال والأحجام، وتصاميم هندسية رائعة، وقد تلمح سلحفاة بحرية عملاقة أو أخطبوطاً أو قرشاً مسرعاً.

إن هذا التنوّع الهائل في حجم ومظهر ولون وتعضية أجسام الحيوانات يستحضر أسئلة عميقة حول أصول الأشكال الحيوانية: كيف تولّدت الأشكال المتمايزة؟ وكيف تطوّر هذا التنوعّ الهائل في الأشكال؟ إنها أسئلة قديمة في علم الأحياء ترجع إلى ما قبل عصر داروين وبيتس ووالاس، لكن أجوبتها اكتُشِفت حديثاً. هذه الأجوبة مدهشة وعميقة لدرجة إحداث ثورة في فهمنا لعملية تكوين عالم الحيوان وموقعنا فيه.

إن الحافز الأولي لكتابة هذا الكتاب هو هذا الانجذاب الذي نتشاركه جميعاً لشكل الحيوان، لكنني أهدف كذلك، إلى جذب نظر القارئ ودهشته نحو كيفية تكوّن شكل الحيوان، -أي فهمنا الحديث للعمليات الأحيائية التي تولّد النمط[1] (pattern) والتنوعّ في تصميم الحيوان. تكمن تحت العناصر المتعدّدة والمرئية من شكل الحيوان عمليات مميزّة وجميلة بحدّ ذاتها؛ في تحويلها خلية واحدة غاية في الصغر إلى كائن كبير معقّد شديد التنظيم ذي نمط محدّد. عمليات مميّزة صاغت مع الزمن مملكةً من ملايين التصاميم المتمايزة.

الأجنّة والتطوّر

إن المنهج الأول الذي اتخذه علماء الطبيعة للتعامل مع التنوّع الهائل للحيوانات هو تصنيفها في مجموعات مثل: الفقاريات (Vertebrates) (متضمنة الأسماك والبرمائيات والزواحف والطيور والثدييات)، ومفصليّات الأرجل (متضمنة الحشرات والقشريّات (Crustaceans) والعنكبوتيات (Arachnids) وغيرها)، لكن تكمن العديد من الاختلافات بين هذه المجموعات وداخل كل منها. فما الذي يجعل نوعاً من الأسماك مختلفاً عن السمندر (Salamander)؟ أو حشرة مختلفة عن عنكبوت؟ وعلى نطاق أضيق، من الواضح أن النمر قط، لكن ما الذي يجعله مختلفاً عن القط المنزلي؟ وما الذي يجعلنا مختلفين عن الشمبانزي؟

---

(1) النمط كلمة تصف في الأصل الشكل المتكرر على اللباس والفرش وهي في سياق الكتاب تعني كل ما يمكن أن يحمل هذا المعنى من الأشكال المتكرّرة في أجنحة الفراش والطيور، إلى شكل الأصابع وترتيبها، إلى شكل النشاط الجيني عند تمييزه بصبغة كاشفة. راجع مادة «نمط» في لسان العرب للاستفاضة. المترجمان

إن المفتاح الذي يفكّ لنا رتاج هذا السؤال يكمن في استيعابنا أن الشكل الحيواني هو في الأساس نتاج عمليتين: النموّ من بويضة، والتطوّر عن الأسلاف. وحتى نفهم أصل هذا التعدّد في أشكال الحيوانات يجب أن نفهم هاتين العمليتين والعلاقة الوثيقة بينهما. النموّ ببساطة هو العملية التي تحول بويضةً إلى جنين، ومن جنين إلى شكل مكتمل، أما التطوّر فيحدث من خلال التغيّرات التي تطرأ على عملية النموّ.

تحبس هاتان العمليتان أنفاس المراقبين، إذ من خلية واحدة (بويضة ملقّحة) يتشكل كائن بالغ التعقيد. في غضون يوم واحد (كما هو حال يرقة ذبابة)، أو بضعة أسابيع (مثل الفأر)، أو عدة شهور (مثل الإنسان)، تنقسم وتتكاثر هذه البويضة خلال عملية النموّ إلى ملايين أو بلايين الخلايا، وفي حالة الإنسان، ربما تشكّل عشرة تريليونات خلية أعضاءه الداخلية وأنسجته وبقية أجزائه الأخرى. قليلة هي تلك الظواهر الطبيعية التي تخلب ألبابنا وتسمّرنا مشدوهين بالقدر ذاته الذي تفعله تحوّلات خلية واحدة إلى جنين ثم إلى كائن بالغ مكتمل الشكل. وقد وصف هذه العملية أحد أعظم الشخصيات في علم الأحياء ونصير داروِن الوثيق توماس هكسلي (Thomas H. Huxley) بقوله:

> إن تساؤلات الدارس للطبيعة تكثر وذهوله يقل، كلما ازداد إلمامه بعملياتها. لكن من كل المعجزات الدائمة التي توفّرها الطبيعة للفحص والتدقيق، ربما كان نموّ نبات أو حيوان من جنينه هو الأكثر استحقاقاً للإعجاب.

[أمثال وتأمّلات] *Aphorisms and Reflections* (1907)

لقد فُهمت العلاقة الوثيقة بين النموّ والتطوّر في علم الأحياء منذ فترة طويلة. فقد اعتمد كل من دارون في كتابيه **أصل الأنواع** *The Origin of Species* عام 1859 و[**سلالة الإنسان**] *The Descent of Man* عام 1871، وهكسلي في تحفته القصيرة [**دليل حول موقع الإنسان في الطبيعة**] *Evidence as to Man's Place in Nature* عام 1863، اعتماداً كبيراً على حقائق من علم الأجنّة (كما كانت في أواسط القرن التاسع عشر) ليثبتا انتماء الإنسان لعالم الحيوان، ويبرهنا بواسطة دليل غير قابل للجدل على نظرية التطوّر. لقد دعا دارون قارئه لتأمل كيف أن تغيّرات طفيفة طرأت في مراحل مختلفة من عملية النموّ، وفي أجزاء مختلفة من الجسد، على مدار آلاف أو ملايين الأجيال خلال فترة امتدت ملايين السنين، استطاعت إنتاج أشكال مختلفة متأقلمة مع ظروف شتى وتمتلك قدرات فريدة. هذا هو التطوّر باختصار.

أما بالنسبة لهكسلي، فقد كان لبّ حجته بسيطاً: ربما نعجب من عملية تحوّل البويضة إلى فرد بالغ، لكننا نقبلها كحقيقة مشاهدة. ومن ثم فإن فقر الخيال هو المسؤول عن عدم إدراك أن التغيّرات المتراكمة في عملية النموّ خلال فترات زمنية طويلة، أطول بكثير من مدى التجربة الإنسانية، تصوغ تنوّع الحياة. وعليه فالتطوّر طبيعي تماماً كالنموّ.

> التطوّر عملية طبيعية مشابهة في أسلوبها لنموّ شجرة من بذرتها، أو طير من بيضته، لذلك فإنه يستبعِدُ الخلق أو أي تدخل آخر فوق طبيعي.
>
> *Aphorisms and Reflections* (1907)

رغم إصابة داروين وهكسلي في اعتبار النموّ مفتاحاً للتطوّر، إلاّ أنهما لم يُحرزا فعلياً أي تقدم في فهم أسرار النموّ طيلة ما يزيد على 100 عام بعد إنجازاتهما الكبرى. لقد كان اللغز المتعلّق بكيفية إنتاج بويضة بسيطة فرداً مكتملاً أحد أكثر الأسئلة مراوغة في علم الأحياء. اعتقد الكثيرون أن النموّ عملية معقّدة جداً، ذلك لأن تفاسير النموّ تتعدد بتعدّد الأنواع الحية المختلفة. كان المسعى محبطاً جداً بحيث إن دراسة علم الأجنة (Embryology) والوراثة (Heredity) والتطوّر، التي كانت متشابكة معاً وتشكل صميم فكر عِلم الأحياء قبل قرن، تفرّقت إلى حقول مختلفة، عندما بحث كل منها عن تحديد مبادئه الخاصة.

ولأن علم الأجنة توقّف عن النموّ فترة طويلة، فإنه لم يلعب دوراً فيما سُميَ «النظرية التركيبية الحديثة» (Modern Synthesis) للفكر التطوّري التي ظهرت في ثلاثينيات وأربعينيات القرن العشرين. سعى علماء الأحياء، في العقود التي تلت داروين، لفهم آليات التطوّر؛ ففي زمن أصل الأنواع لم تكن آليات توارث الصفات معروفة، ولم يكتشف عمل جريجور مندل[1] ثانية إلا بعد عقود، أما علم الجينات (Genetics) فلم يزدهر حتى العقد الأول من القرن العشرين. حاول علماء من مختلف فروع علم الأحياء فهم التطوّر مستعينين بأساليب مختلفة جداً. على سبيل المثال، ركّز علم الأحافير (Paleontology) على المدد الزمنية الطويلة والسجل الأحفوري وتطوّر الأصنوفات العليا (taxa)[2].

(1) جريجور مندل (Gregor Mendel) راهب نمساوي يعتبر مؤسس علم الجينات من خلال اكتشافه أن بعض الصفات الوراثية في نبات البازلاء تنتقل وفقاً لنمط معين. تم الانتباه لاكتشاف مندل العلمي بعد وفاته بعقود. المترجمان

(2) الأصنوفة (taxon) هي وحدة تنظيمية في علم التصنيف (taxonomy) الذي يوزع =

أما علماء تصنيف الأحياء (systematists) فقد اهتموا بطبيعة الأنواع وعملية التناوع[1] (speciation). بينما درس علماء الجينات بشكل عام تنوّع الصفات في أنواع قليلة. كانت العلاقة بين هذه الفروع منقطعة، بل ظهرت أحياناً فيما بينها العداوة حول أيها الأجدر بتقديم رؤية ذات شأن حول علم الأحياء التطوّري، لكن الانسجام حلّ تدريجياً عبر تكامل وجهات نظر تطوّرية على مستويات متعدّدة. فقد أشار كتاب جوليان هكسلي (Julian Huxley) [**التطوّر: النظرية التركيبية الحديثة**] *Evolution: The Modern Synthesis* عام 1942 إلى هذه الوحدة والقبول العام لفكرتين أساسيتين: الفكرة الأولى هي أنه يمكن شرح التطوّر التدريجي من خلال تغيّرات جينية طفيفة تنتج تنوّعاً يكون خاضعاً لتأثير الانتخاب الطبيعي. الفكرة الثانية هي أن التطوّر ذا المقدار الأكبر في المستويات التصنيفية العليا يمكن شرحه من خلال هذا التطوّر التدريجي لكن على مدى فترات زمنية أطول.

لقد أسست «النظرية التركيبية الحديثة» الكيفية التي نوقش ودرس بها علم الأحياء التطوّري في الستين سنة الماضية، لكن على الرغم من مصطلحي «التركيب» و«الحديث» فإن الصورة ظلّت ناقصة. فمنذ تأسيسها وحتى وقت قريب كان باستطاعتنا القول إن الأشكال تتغيّر وإن الانتخاب الطبيعي قوة فاعلة، لكننا لم نكن نستطيع قول أي شيء عن كيفية تغيّر الأشكال، تلك الدراما المرئية للتطوّر كما صوّرت مثلاً في السجل الأحفوري. تعاملت «النظرية التركيبية الحديثة» مع علم الأجنة

= المتعضيات في أصنوفات (taxa) بناء على الصفات المشتركة بينها، راجع الملحق رقم 1. المترجمان

(1) التناوع هو تكوين نوع جديد في مرحلة ما من مراحل التطور. المترجمان

«كصندوق أسود» يحوِّل بطريقة ما معلومات وراثية إلى حيوانات ثلاثية الأبعاد قادرة على أداء وظائف عديدة.

استمر المأزق عدة عقود؛ فانشغل علم الأجنة بما يمكن دراسته عبر التلاعب ببويضات وأجنّة أنواع قليلة، ولكن تلاشى من مجال رؤيته الإطار التطوّري. كذلك ظل علم الأحياء التطوّري يدرس التنوعّ الجيني في الجماعات، جاهلاً بالعلاقة بين الجينات والشكل. ولعل الأسوأ هو ذلك التصوّر الذي انتشر لدى البعض من أن المكان الطبيعي لعلم الأحياء التطوّري هو المتاحف المهجورة.

هكذا كان الوضع في سبعينيات القرن العشرين عندما تعالت أصوات تنادي بإعادة توحيد علمَي الأجنة والأحياء التطوّرية. كان أبرز هذه الأصوات ستيفن جاي جود (Stephen Jay Gould) الذي أحيا عبر كتابه [التخلّق والتعرّق] *Ontogeny and Phylogeny* النقاش حول الطرق التي قد تؤثر بها تغييرات في النمو على التطوّر. وهزّ جود أيضًا علم الأحياء التطوري عندما قدم مع نيلز إلدريدج (Niles Eldredge) نظرة جديدة للأنماط الرئيسة في السجل الأحفوري، ليقدما فكرة *التوازنات المتقطعة* (*punctuated equilibria*) التي مفادها أن التطور تميز بفترات طويلة من الركود (الاتزان)، تخللتها فترات قصيرة من التغيير السريع (فواصل). أعاد جود في كتابه هذا وكتاباته اللاحقة دراسة ماهية «الصورة الكبرى» في علم الأحياء التطوري وقام بتحديد الأسئلة الرئيسة التي بقيت دون حل. غرس جود بذوراً في عدد غير قليل من العلماء الشباب سريعي التأثّر، وكنت أحدهم.

بدا لي ولغيري، المنبهرين بالنجاحات البارزة لعلم الأحياء الجزيئية في

شرح كيفية عمل الجينات، أن الوضع في علمَي الأحياء التطوري والأجنة غير مرضٍ، لكنه مليء بالفرص الواعدة. حوّلت معرفتنا المحدودة بعلم الأجنة أغلب النقاش في علم الأحياء التطوري حول تطور الشكل إلى تخمينات عقيمة. فكيف يمكن أن نحرز تقدماً في الإجابة عن أسئلة بشأن تطوّر الشكل دون أن نملك فهماً علمياً لكيفية تخلُّق الشكل في المقام الأول؟ نجح علم جينات الجماعات (Population Genetics) في تأسيس المبدأ بأن التطوّر ينتج عن تغيّرات في الجينات، لكنه كان مبدأ دون دليل. لم يتم توصيف أي جين أثّر في شكل أو تطوّر أيّ حيوان. إنَّ أيّ فهم جديد للتطوّر يستوجب حدوث اختراق في علم الأجنة.

ثورة الإيفوديفو

أدرك الجميع أن الجينات يجب أن تكون في مركز الألغاز في مسألتي النموّ والتطوّر. إذ تبدو الحمر الوحشية كالحمر الوحشية، والفراشات كالفراشات، ونبدو نحن البشر بالشكل الذي نظهر عليه بسبب الجينات التي نحملها. لكن المشكلة هي أنه لم يكن بحوزتنا سوى لمحات قليلة عن ماهية الجينات التي تؤثّر في نمو الحيوان.

انقطع أخيراً الجفاف الطويل في علم الأجنة بفضل عدد من علماء الجينات اللامعين الذين وضعوا -أثناء عملهم على ذبابة الفاكهة[1]- مخططات حقل التجارب الأساسي لعلم الجينات في الثمانين سنة الماضية،

(1) كانت ذبابة الفاكهة (*Drosophila melanogaster*) من أول وأهم الكائنات الحيّة النموذجية (model organism) التي استخدمت في أبحاث علوم الوراثة والنمو والتطور، ويرتبط تاريخها في الأبحاث الأحيائية بتجارب توماس هَنت مورجان في جامعة كولومبيا عام 1910. المترجمان

لتحديد الجينات التي تتحكم بنمو الذبابة. أعطى اكتشاف هذه الجينات ودراستها في ثمانينيات القرن العشرين أفقاً جديداً مثيراً لدراسة النموّ وكشف المنطق والنظام وراء تكّون شكل الحيوان.

على إثر تمييز المجموعات الأولى من جينات ذبابة الفاكهة، أتت المفاجأة المذهلة التي أدت إلى ثورة جديدة في علم الأحياء التطوّري. افترض علماء الأحياء لأكثر من قرن أن الحيوانات المتباينة أنشأتها جينات مختلفة بطرق مختلفة تماماً. فكلما عظُمَ التباين في شكل الحيوان قلّ (أو انعدم) ما يتشاركه نموّ حيوانين اثنين على مستوى الجينات. كتب إرنست مَيَر (Ernst Mayr)، أحد مهندسي التركيب الحديث: «البحث عن «الجينات المتناددة (homologous genes) بين الحيوانات عملية عقيمة جداً إن استثنينا الأنواع ذات القرابة الكبيرة». ولكن على عكس توقّعات أي عالم أحياء، فأغلب الجينات التي اكتشف أنها تنظّم الجوانب الرئيسة في جسم ذبابة الفاكهة، وُجد لها نظائر مماثلة تفعل الشيء ذاته في معظم الحيوانات، بما في ذلك الإنسان. ولقد تبع هذا الاكتشاف معرفة أن نموّ أجزاء الجسم المختلفة، مثل العيون والأطراف والقلب، التي يختلف قوامها على نحو واسع بين الحيوانات، واعتُقد طويلاً أنها تطوّرت بشكل مختلف تماماً، محكوم أيضًا بنفس الجينات في الحيوانات المختلفة. وهكذا أصبحت مقارنة جينات النموّ بين الأنواع حقلاً جديداً يقع في منطقة تقاطع عِلمي الأحياء التطوري والأجنة: علم أحياء النموّ التطوري أو ما يعرف اختصاراً بالإيفوديفو (Evo Devo).

كشفت المساعي الأولى لثورة الإيفوديفو أنه بصرف النظر عن الاختلافات الكبيرة في المظهر ووظائف الأعضاء، فإن كل الحيوانات

المعقدة -الذباب، وصائدات الذباب (flycatchers)، والديناصورات، وثلاثيات الفصوص، والفراشات، والحمر الوحشية، والإنسان -تشترك في «عُدَّة أدوات» (tool kit) شائعة من «الجينات الحاكمة» (master genes) التي تدير عمليات تكوين وتنميط جميع هذه الأجسام وأجزائها المختلفة. سأصف بالتفصيل اكتشاف «عُدَّة الأدوات» وخصائصها الرائعة في الفصل الثالث. لكن ما ينبغي إدراكه منذ البداية هو أن اكتشاف هذه الجينات قد هشَّم أفكارنا السابقة عن علاقة الحيوانات بعضها ببعض، وعما جعل الحيوانات مختلفة، وقدّم طريقة جديدة كلياً للنظر إلى التطور.

نعرف الآن بعد تحديد متواليةِ[1] الدنا لعدة أنواع (جينوماتها[2] Genome)، أن الإنسان يتشارك مع الذباب مجموعة كبيرة من جينات النموّ، وأن الفأر والإنسان يملكان ما يقارب 29 ألف جين متطابق، وأن الشمبانزي والإنسان متطابقان بما يقارب 99٪ على صعيد الدنا. ينبغي أن تكون هذه الحقائق والأرقام مدعاة لتواضع الراغبين في وضع الإنسان فوق عالم الحيوان وليس جزءًا متطوّراً منه. أتمنى أن تنتشر على نحو واسع الرؤية التي سمعت الكوميدي المرتجل لويس بلاك (Lewis Black) يعبّر عنها، حين قال إنه لن يفكر بمجادلة المستخفين بنظرية التطوّر لأن «لدينا الأحافير، لذلك ننتصر». ورغم بلاغة بلاك

(1) تحديد المتوالية (sequencing) خطوات معملية تجرى لتحديد التسلسل الدقيق لقواعد الدنا. المترجمان

(2) ينتظم الدنا في جزيئات يختلف عددها حسب نوع الكائن الحي. يسمى كل جزيء كروموسوماً. الجينوم هو مجموع المعلومات الوراثية الموجودة في كل الكروموسومات. المترجمان

إلا أنّ الأحافير ليست سوى جزء بسيط مما لدينا.

في الواقع، إن الحقائق والرؤى الجديدة التي يقدمها عِلْما الأجنة والإيفوديفو تُضعضع بقايا ذلك الخطاب القديم المناهض للتطوّر بشأن جدوى الأشكال الوسيطة (intermediate forms) أو احتمالية تطوّر البنى المعقّدة. إننا نفهم الآن كيف يُشاد التعقيد من خلية واحدة إلى حيوان كامل، ويمكننا أن نرى، باستخدام تشكيلة جديدة من الأساليب القوية، كيف أن التعديلات الطارئة على النموّ تزيد التعقيد وتوسع التنوعّ. إن اكتشاف «عدة الأدوات» الجينية الغابرة دليل لا يدحض على أن الحيوانات، متضمنة الإنسان، قد طرأت عليها تعديلات خلال تحدّرها من سلف مشترك بسيط. باستطاعة الإيفوديفو اقتفاء أثر التعديلات على الأشكال خلال حقب طويلة من الزمن التطوّري لرؤية كيف تحوّرت زعانف الأسماك إلى أطراف في الفقاريات البرية، وكيف أنّ دورات متتالية من الإبداع والتعديل صنعت أجزاء الفم، والمخالب السامة، وزوائد (appendages) التغذية والسباحة، والخياشيم، والأجنحة من أرجل مشي بسيطة تشبه الأنبوب، وكيف نشأت أنواع عديدة من العيون بدءًا من مجموعة خلايا حسّاسة للضوء. ما قدمه الإيفوديفو من ثروة معلومات جديدة يرسم صورة واضحة للكيفية التي صُنعت وتطوّرت بها الأشكال الحيوانية.

مفارقة عدّة الأدوات وجذور التنوّع

تسرّب ببطء للوعي العام امتلاك الحيوانات لذات الجينات المسؤولة عن بناء الجسم، وأيضًا حجم التشابهات بين جينومنا البشري

وجينومات الحيوانات الأخرى. لكن ما يُهْمَل عموماً هو كيف أن اكتشاف عدة الأدوات المشتركة والتشابهات الكبيرة بين جينومات الأنواع المختلفة يعرض تناقضاً ظاهرياً جلياً. إن كانت هذه التشكيلات الجينية مشتركة على نحو واسع، فكيف تنشأ الاختلافات؟ إن حل هذه الإشكالية وتبعاتها محوري لقصتي. ويحلّ التناقض الظاهري للتشابه الجيني الكبير بين أنواع متنوّعة من خلال فكرتين أساسيتين سأطرحهما وأطورهما خلال الكتاب، وسأرجع لهما باستمرار. فهما ضروريتان لإدراك أن التعليمات الخاصة ببناء حيوان مشفرة في دناه، وضروريتان لفهم كيف ينتج الشكل ويتطوّر. لم تجد هذه الأفكار سوى اهتمام ضئيل، إن لم يكن معدوماً، في الإعلام العام، لكن لهذه الأفكار تأثيرات عميقة في فهم الفصول العظيمة في تاريخ الحياة مثل تفشي الأشكال الحيوانية في أثناء العصر الكامبري (Cambrian period)، وتطوّر التنوّع في مجموعات مثل الفراشات أو الخنافس أو العصافير، وتطوّرنا من سلف مشترك مع الشمبانزي والغوريلا.

الفكرة الأولى هي أن التنوّع لا يتعلق كثيراً بعدد جينات عدة الأدوات، لكن «بالطريقة التي تستخدم بها» حسب تعبير إريك كلابتون (Eric Clapton). ويعتمد نموّ الشكل على تشغيل الجينات أو إيقافها في أوقات وأماكن مختلفة خلال المدة الزمنية للنموّ. تنشأ الاختلافات في الشكل من تغيرات تطورية حدثت في مكان وتوقيت استخدام هذه الجينات، وخصوصاً تلك الجينات التي تؤثّر في عدد البنى ومظهرها وحجمها. سنرى أن هناك عدة أساليب لتغيير الطريقة التي تستخدم بها الجينات والتي أدت إلى خلق تفاوت هائل في تصاميم الأجسام، وتنميط

(صناعة النمط) الأشكال المفردة.

أما الفكرة الثانية فمعنية بالموضع في الجينوم الذي يوجد فيه الدليل الحاسم على التطوّر في الشكل. لقد اتضح أن هذا الدليل لم يكن موجوداً حيث كنا نبحث عنه أغلب وقتنا في الأربعين سنة الماضية. لقد استقر فهمنا منذ فترة طويلة على أن الجينات مكوّنة من سلاسل دنا طويلة تُفك شفرتها في عملية عامة[1] لإنتاج بروتينات تقوم بالعمل الفعلي في الخلايا والأجسام الحيوانية. وقد عرفت الشفرة الجينية التي تنتج البروتينات -المكونة من عشرين مفردة[2] -منذ أربعين عاماً، وعليه تسهل معرفة سلاسل البروتينات الناتجة عن متواليات الدنا المشفرة. لكن ما لا يتم الانتباه إليه بشكل كافٍ هو أن جزءاً ضئيلاً من دنانا -ما يقدر بنحو 1,5٪ فقط -يولِّد ما يقارب 25 ألف بروتين في أجسامنا. ما هي إذن وظيفة الجزء الأكبر من دنانا؟ يتكون نحو 3٪ منه من 100 مليون قُطيْعة وظيفتها «التنظيم». يحدد هذا الدنا التنظيمي توقيت إطلاق ما ينتجه جين معيّن، والكمية المصنوعة منه، والموضع المستهدف. سوف أشرح كيف أن الدنا التنظيمي موضّب في أجهزة صغيرة مبهرة تدمج معلومات عن الموضع في الجنين ومدّة عملية النمو. تُحَوِّل مخرجات هذه الأجهزة في النهاية إلى أجزاء تشريحية تكوّن أشكال الحيوانات. يحتوي الدنا التنظيمي على تعليمات لبناء البنية التشريحية، وتؤدي التغيّرات التطوّرية في هذا الدنا التنظيمي إلى تنوّع الشكل الحيواني.

---

(1) عملية عامة (universal process) في جميع الكائنات الحية، وهي هنا أن المعلومات الوراثية تنتقل من الدنا إلى الرنا المرسال إلى البروتينات. المترجمان

(2) تبنى البروتينات من 20 حمضاً أمينياً، ويكتب كل حمض أميني باستخدام ثلاث قواعد دنا. المترجمان

ينبغي أن أغطي بعض الجزئيات كي يتضح دور وأهمية الدنا التنظيمي في التطوّر. يجب أن يلم المرء أولاً بالكيفية التي تبنى بها الحيوانات، وأدوار الجينات في النموّ الجنيني. سيغطي هذا الموضوع القسم الأول من الكتاب، وسيحمل لوحده العديد من الفوائد. سأرسم بعض الملامح العامة لمعمار جسم الحيوان، واتجاهات تطوّر تصميم الجسم التي تتشاركها مجموعات مختلفة من الحيوانات (الفصل الأول). وسأصف بعض الأشكال الطافرة (mutant forms) المذهلة التي قادت علماء الأحياء لاكتشاف عُدة أدوات «الجينات الحاكمة» التي تنظّم النمو (الفصلان الثاني والثالث). وسنرى هذه الجينات وهي منهمكة في عملها، وكيف أنها تعكس منطق وترتيب عملية بناء أجسام الحيوانات والأنماط المعقّدة (الفصل الرابع). وسنطلع أيضًا على الأجهزة الموجودة في الجينوم التي تحتوي تعليمات لبناء البنية التشريحية (الفصل الخامس).

سأربط في القسم الثاني من الكتاب ما تعلمناه عن الأحافير والجينات والأجنة معاً لمعرفة عملية صناعة التنوّع الحيواني. وسأسلط الضوء على بعض من أكثر الأحداث أهمية وتشويقاً وإقناعاً في تطوّر الحيوان، تلك التي ترسم كيف صاغت الطبيعة تصميمات مفردة عديدة من عدد قليل من لبنات البناء. وسأتفحّص بعمق أسس النموّ والأسس الجينية للانفجار الكامبري الذي أنتج العديد من الأنماط الأساسية للحيوانات وأجزاء الجسم التي نعرفها اليوم (الفصلان السادس والسابع). وسأسبر جذور أنماط جناح الفراشة باعتبارها مثالاً باهراً على أن اختراع الطبيعة يتم عن طريق تعليم الجينات الغابرة حيلاً جديدة (الفصل الثامن). وكذلك سأروي قصصاً عن تطوّر ريش طيور الجزر وألوان الفراء في

الثدييات (الفصل التاسع). كلها قصص تتميّز بطابع جمالي وتعطينا رؤية عميقة للعملية التطوّرية، ولكن لهذه القصص نتائج مباشرة وآنية بحكم كونها دراسات تكشف ذات العمليات التي شكلت أصل الإنسان. وسأصف في الفصول الأخيرة من الكتاب صناعة نوعنا المُميّز غالباً «بعقله الجميل» أكثر من أية صفة مبدئية أخرى (الفصل العاشر). وسأقتفي أثر بداياتنا من سلف يشبه النسّانين (apelike) قبل 6 ملايين سنة لأتتبع التغييرات الجسدية والنهائية التي قادت إلى ظهور *الإنسان العاقل*. وسأناقش نطاق وأنواع التغييرات الجينية التي حدثت في أثناء مسار تطورنا، وتلك المسؤولة على الأرجح عن تطوّر الصفات التي يتميّز بها الإنسان.

العظمة في تركيب أكثر حداثة:

المرحلة الثالثة

يمكن أن ننظر إلى القصة المستمرة لنظرية التطوّر باعتبارها دراما تتكوّن على الأقل من ثلاث مراحل. في المرحلة الأولى ختم دارون، قبل 150 سنة تقريباً، أهم كتاب في تاريخ علم الأحياء بحضّ قرائه على مشاهدة العظمة في رؤيته للطبيعة، في كيف أنه «من بداية بسيطة جداً، قد تطوّرت، ومازالت تتطوّر، أشكال لانهائية غاية في الجمال». في المرحلة الثانية وحد معماريو «النظرية التركيبية الحديثة» ثلاثة حقول علمية على الأقل ليصوغوا تركيباً فخماً. أما في المرحلة الثالثة، فقد وفر علما الأجنة والنموّ التطوّري رؤية حول صناعة شكل الحيوان والتنوّع، وقد تميّزت هذه الرؤية بعظمة خاصة. جزء من هذه الرؤية جليّ، حيث يمكننا

مشاهدة الكيفية التي تتبلور بها الأشكال اللانهائية لحيوانات مختلفة.

إن الجمال ليس قضية سطحية في العلم، فأسمى العلوم هو ما تنتجه بشكل متكامل جوانبنا العاطفية والفكرية، أي فصا دماغنا الأيمن (العاطفي أو المبدع) والأيسر (المنطقي). إن أعظم نشوات الاكتشاف العلمي هي ما تجمع الجماليات الحسية والرؤية المفهومية. لاحظ الفيزيائي فيكتور فايسكوبف (وهو عازف بيانو أيضاً) أن «الجميل في العلم، هو ذاته الجميل في بيتهوفن؛ أحداث ضبابية، وفجأة تبصر رابطاً يعبر عن هواجس الإنسان التي تسكن أعماقك، ويصل الأشياء التي كانت دائماً بداخلنا لكنها لم توصل أبداً من قبل».

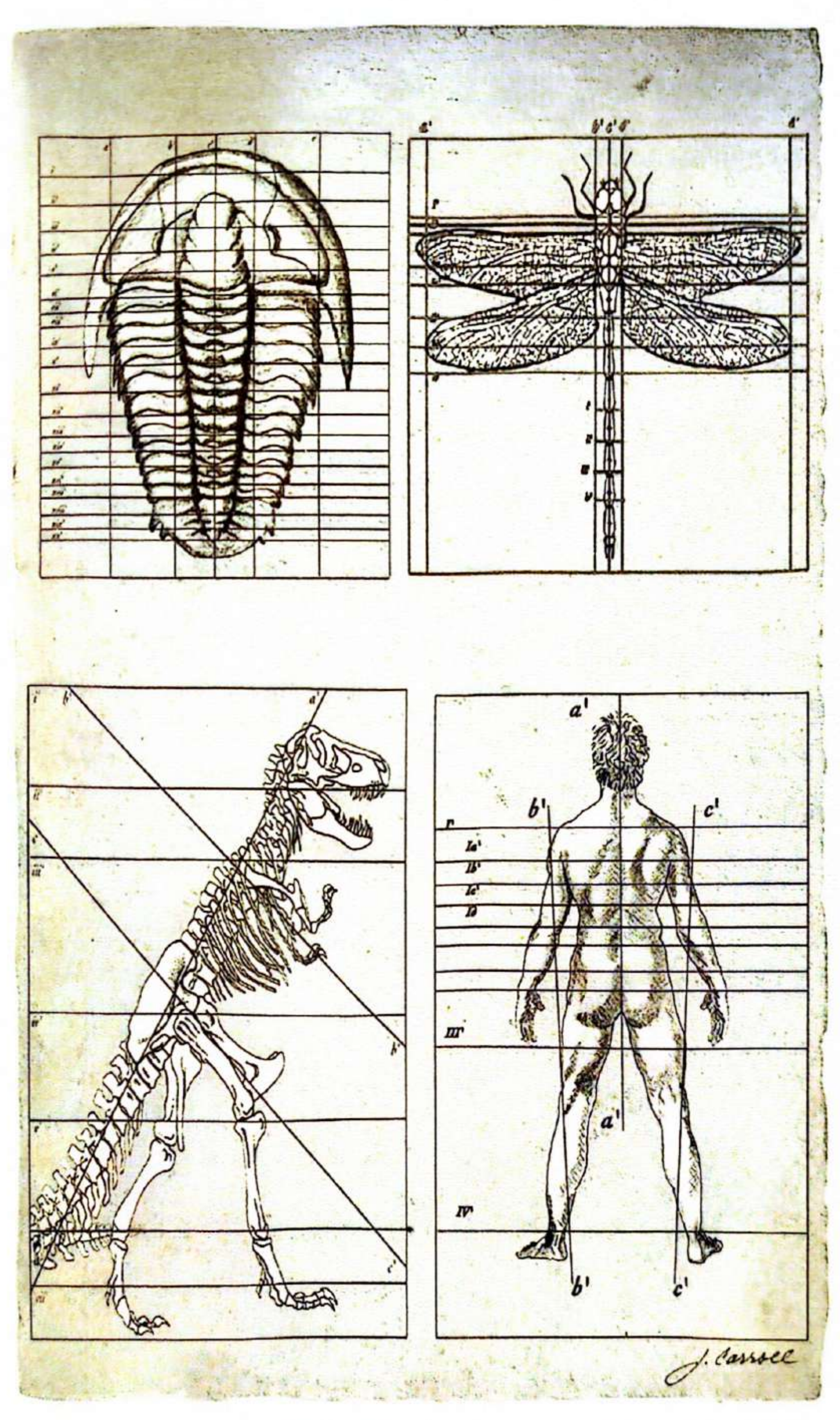
باختصار يوفر أفضل العلوم تجربة مشابهة لتلك التي توفرها أفضل الكتَب أو الأفلام. تشغلنا أحجية أو دراما، ونتابع قصة ما من أجل كشفٍ يجعلنا في أفضل أمثلته نرى ونفهم العالم بجلاء أكبر. وإذا كانت الحقيقة هي القيد الذي يحدّ من حركة العالِم، فهل باستطاعة العلم الطبيعي أن يلهمنا ويبهجنا كما يفعل عالم الرواية؟

نشر رديارد كبلينج (RudyardKipling) قبل مائة سنة كتابه الكلاسيكي [قصص متقنة] *Just So Stories*، وهو مجموعة قصص للأطفال استلهمها من تجربته في الهند. بعض قصص كبلينج الساحرة حملت عناوين مثل: «كيف حصل النمر على رقطته؟» و«كيف حصل الجمل على حدبته؟» و«الفراشة المدموغة». نسج الكتاب حكايات خيالية عن كيفية اكتساب بعض حيواناتنا المفضّلة والأكثر غرابة ملامحها البارزة. بذات اللذة التي عللت بها **قصص متقنة** كيفية ظهور البقع والخطوط والحدبات والقرون، يستطيع علم الأحياء الآن سرد قصصٍ عن الفراشات والحمر الوحشية

والنمور التي أؤكد أنّ كل جزء منها لا يقل سحراً عن قصص كبلينج الخرافية. بل الأكثر من ذلك، أن قصص علم الأحياء تقدّم حقائق أنيقة بسيطة تُعمِّق فهمنا لكل الأشكال الحيوانية، بما في ذلك أنفسنا.

القسم الأول:

صناعة الحيوانات



أبنية معمارية حيوانية قديمة وحديثة. جيمي كارول (Jamie Carroll)

الفصل 1

معمار الحيوان: أشكال حديثة، تصاميم قديمة

«الغموض والجمال النابع من الأشكال العضوية هو ما يربكنا»

روس هاريسون (Ross Harrison)، عالم أجنة (1913)

لا يقتصر التنوّع المذهل لأشكال الحيوان على ما يدبُّ فوق اليابسة أو يعمر أعماق البحر، فتحت الأرض تقبع حكاية تربو على الستمائة مليون سنة من تاريخ الحيوان، هذه الحكاية مدفونة إمّا تحت بضعة إنشات من الرمل، أو متغلغلة في بضعة آلاف قدم تحت الصخر، بدءاً بالأشكال الغامضة للحيوانات الأولى في السِجّيل الكندي (Canadian shale)

إلى الأجسام الهائلة للديناصورات في تلال ووديان الغرب الأمريكي، وشظايا أسنان وجماجم أسلافنا ثنائيي القدم في وادي الصدع بشرق إفريقيا؛ إنّ بعض ما يرقد تحت الأرض ينطوي على مفاجآت أكثر إدهاشاً مقارنة بما يتنفس فوقها.

لقد علمت ذلك مباشرة مؤخراً في فلوريدا، الوجهة المفضّلة لدى من يقضون الإجازات والمتقاعدين الباحثين عن الشمس والتسلية والاسترخاء. إنها أرض النخيل والشواطئ الرملية الناعمة والبجع (pelicans) الرشيق وعقبان الماء (ospreys) وخراف البحر (manatees) اللطيفة والدلافين *والإنسان العاقل (Homo sapiens)* ذي السراويل القصيرة المخططة ... لكنها أيضًا أرض المدرّع (armadillo) الذي يبلغ طوله 6 أقدام والمسْتودون (mastodon) ذي النابين والقرش الذي يبلغ طوله 60 قدماً والجَمل ووحيد القرن والنمر الأمريكي والقطط الحادة الأسنان!

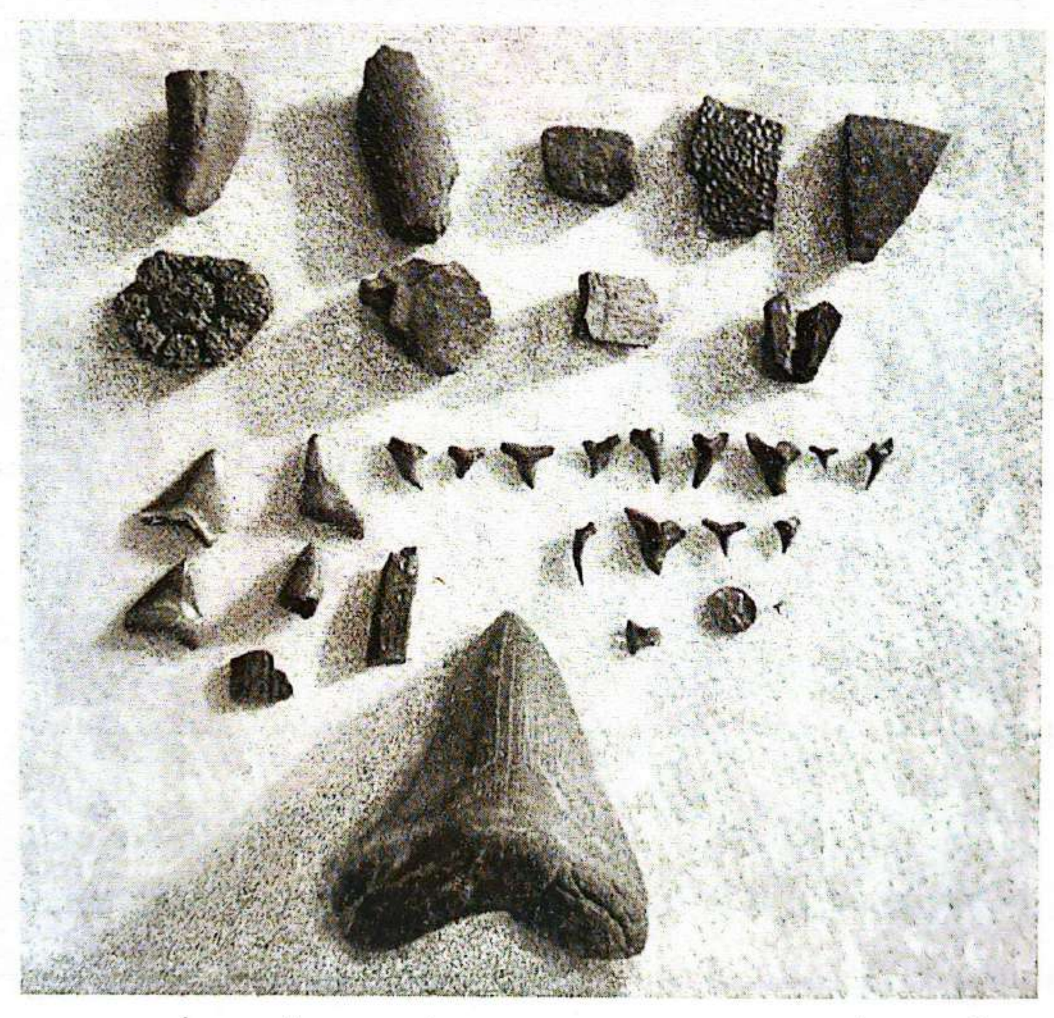
نعم، إنها موجودة فعلاً دون أدنى غرابة، يعتمد ذلك فقط على المكان الذي تنظر إليه.

قد تعثر في حمولة رفش من حصباء نهر يخترق تربة رملية على سن لأحد أنواع القرش العشرة، وقد تبصر أسناناً متفاوتة بدءاً بتلك المشرشرة والمعقوفة إلى الخارج مروراً بالأسنان المرعبة الفتّاكة ذات الستة إنشات للوحش ميجالودون (*Charcharadon megalodon*) المنقرض منذ أزمنة غابرة (الشكل 1 , 1). ستجد أيضاً في ذات الحصباء عظاماً من العصور الجيولوجية الحديثة لفلوريدا: عظام حيوانات التابير (tapir) والكسلان (sloth) والأحصنة والجمال والجليبتودونت (glyptodont) والمستودون

والأطوم (dugongs) وأنواع أخرى اختفت جميعها الآن.

إن هذا التنوّع في أشكال الحيوانات الحية والأحفورية في موضع واحد فقط ينسج أمامنا لغزين أساسيين هما: كيف صُنع الشكل الحيواني؟ وكيف تطوّر هذا العدد الكبير من الأشكال المختلفة؟

قد يبدو للوهلة الأولى هذا التنوّع في الأشكال الحيوانية هائلاً وعصيّا على الفهم. غير أن هناك بعض الخطوط العامة في تصميم الحيوان، وفي هذا الفصل سنسعى سوياً لتبيّن بعض التعميمات في معمار الحيوان وتطوّره،



الشكل 1,1 **أحافير من مجرى نهر في فلوريدا.** عظم حيوان ثديي، وأجزاء من صدفة سلحفاة وأسنان قرش متوفرة بكثرة في الموقع. لاحظ تنوّع الأشكال والأحجام. السن الأكبر يعود للقرش الضخم *كاركارادون ميجالودون*. (جمَعَ وصور الأحافير باتريك كارول).

وستتمكن بها من تقليص هذا التنوّع الكاسح إلى بعض الثيمات الأساسية.

بناء الحيوانات من لبنات

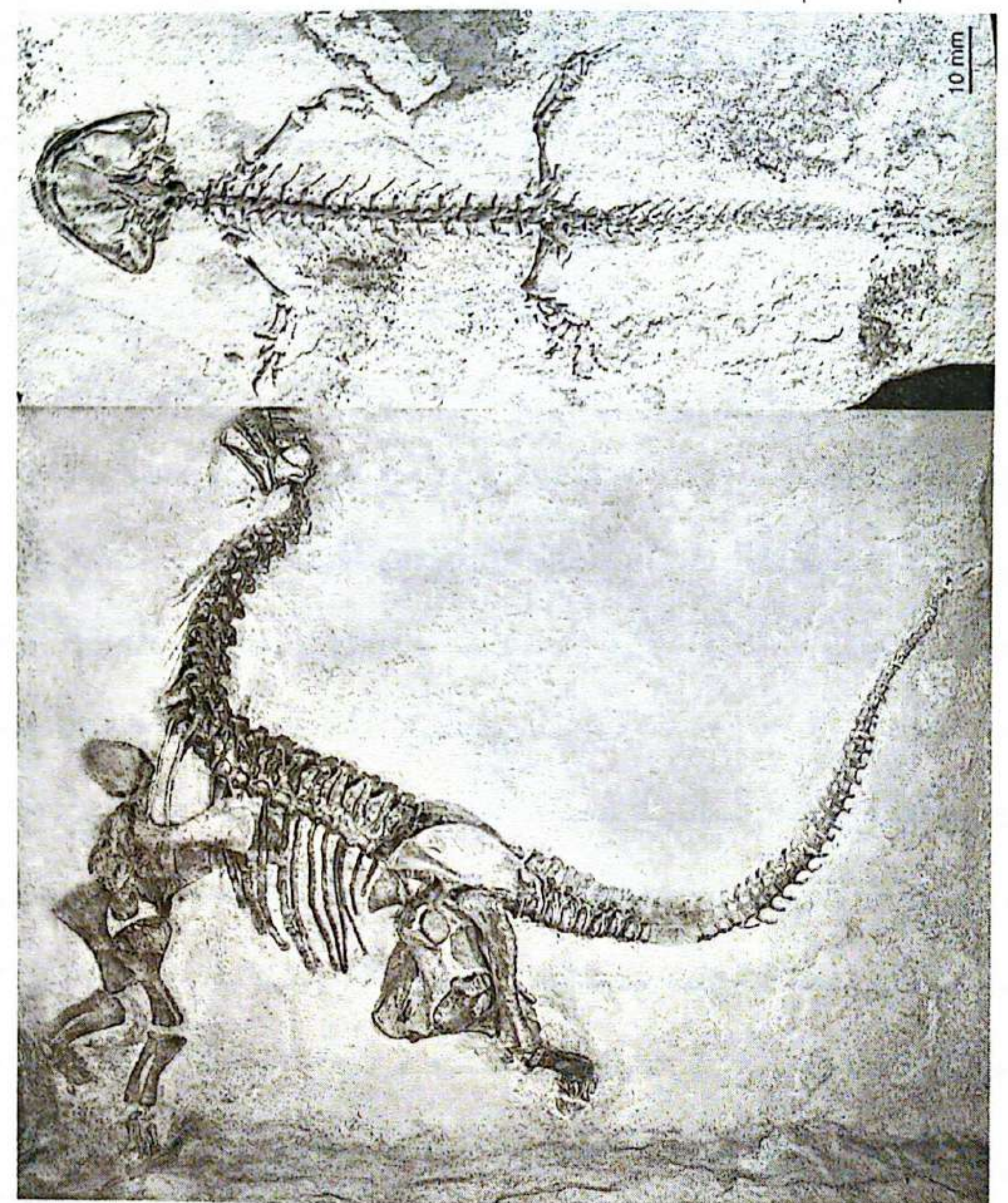
تغدو الثيمة الأساسية لتصميم الحيوان واضحة عندما يحاول المرء معرفة هوية عظم أو سن وجدهُ بملء مجرفة من حصباء نهر فلوريدا. هناك تحديان في هذه المحاولة، الأول معرفة نوع الكائن الحي الذي يعود له الأحفور، والثاني تحديد موقعه في جسم الحيوان. لماذا يصعب ذلك؟ لأن هذا الموقف يعرض حقيقة أساسية في تصميم الحيوان، وهي أن الحيوانات المختلفة ذات القرابة، كالفقاريات، مكوّنة من أجزاء متشابهة جداً.

لنقل إن متخصصاً ساعدنا في تحديد أن العظمة قد تعود لحيوان الأطوم المنقرض. لكن إن كانت تلك العظمة ضلعاً، فأي ضلع هو؟ أو إن كانت إصبع قدم حصان منقرض، فأي إصبع قدم هو؟ يصعب تحديد انتماءات العظام المفردة. يحدّد هذا الوضع الحقيقة الأساسية الثانية في تصميم الحيوان، وهي أن الحيوان الواحد مكوّن من أجزاء عديدة من ذات النوع، مثل لبنات البناء.

قد يكون بعض هذه الأجزاء صغيراً مثل عظم إصبع قدم، أما بعضها الآخر فقد يكون عملاقاً كفقرات بعض الفقاريات. هذه الوحدات الأساسية غابرة في القدم، وقد حوفظ على تناسبها رغم الاختلافات الكبيرة في حجم الجسم، فكل من ديناصورات الصوروبود (sauropod) الهائلة والسمندرات الرقيقة التي عاشت في العصر الجوراسي (Jurassic age) (قبل 150 مليون سنة) تظهر ذات المعمار المدْولي[1] المتكرّر

(1) المدْوَل هو التعريب الذي اخترناه لكلمة (module) وهو مصطلح واسع ينتمي لعدة =

في تصميم جسم الفقاريات (الشكل 2,1).



الشكل 2,1 **المعمار المدْولي للفقاريات فوق:** سمندر من العصر الجوراسي يبلغ طوله عشرة سنتيمترات (ثلث قدم). تحت: كمراصور (*Camarasaurus*) وهو ديناصور صوروبودي من العصر الجوراسي، يناهز طوله تسعة عشرة قدماً. (صورة السمندر تقدمة نيل شوبِن (Neil Shubin) من جامعة شيكاغو، وصورة الكمراصور تقدمة من متحف كارنيجي للتاريخ الطبيعي). كل الحقوق محفوظة.

= حقول والمعنى الأقرب هنا هو ذاك المتصل بالبناء والإنشاءات ويعني الواحدة من القطع المتشابهة التي تركب في البناء الواحد مع اختلافها في الحجم أو تلك القطع التي يمكن تركيبها تبادليا مع الموقع ذاته من البناء. المترجمان

إن ثيمة التصميم المدْولي غير مقتصرة فقط على الفقاريات، فأحافير سجِّيل برجس (Burgess Shale) الشهيرة -من أوائل الحيوانات الكبيرة المعقدة التي عمرت البحار الكامبرية منذ أكثر من 500 مليون سنة -تُظهر كل أنواع التفاوتات (variations) في خريطة الجسم المدْولي (الشكل 1 ,3)، تماماً كما تفعل أخلافها الحية في يومنا هذا.

إن سحر هذه الأحافير متعدّد الجوانب. هناك قطعاً إحساس بالرهبة والتعجب في رؤية ولمس وحوش منقرضة عاشت في عوالم مرّ زمن سحيق منذ تلاشيها، لكننا منجذبون كذلك *لأشكالها*، حيث تظهر الأحافير كيف يستخدم التطوّر الأجزاء المتكرّرة والمعمار المدْولي استخداماً واسعاً في صياغة تصاميم حيوانية.

تعكس أجزاء الجسم المفردة أيضًا ثيمة التصميم المدْولي، فأطرافنا، على سبيل المثال، ذات تصميم مدْولي متشابه، حيث يتكوّن كل طرف من عدة قطع (فخذ، ربلة، كاحل/ عضد، ساعد، معصم)، وتحمل اليدان والقدمان خمس أصابع متشابهة (الشكل 1 ,4). إن المعمار المدْولي لأطراف الفقاريات رباعية الأقدام هو أيضًا تصميم غابر يتجلى بوضوح في الأحافير الجوراسية.

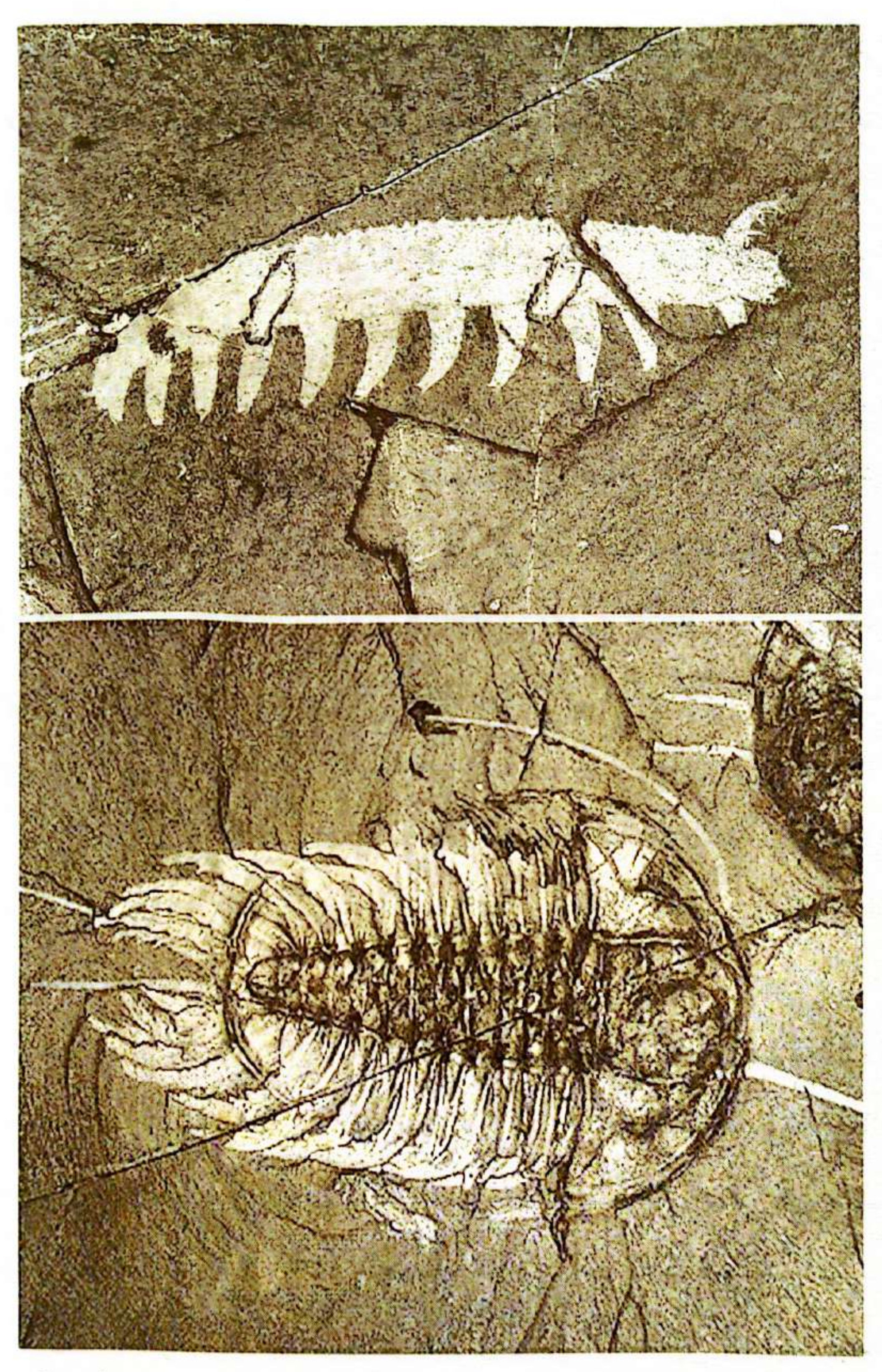
لا يتضح التصميم المدْولي دائماً منذ الوهلة الأولى. فقد تبدو الأنماط المعقدة على جناح الفراشة عشوائية، لكن نظرةً فاحصةً ستُبين للمرء أن النمط الإجمالي مكوّن أيضًا من عناصر مكرّرة. الجزء السفلي من فراشة مورفو الزرقاء مطرز بأنماط مكررة من الخطوط والشارات (chevrons) والبقع، حيث تفصل عروق الجناح كلاً من تلك العناصر المفردة (الشكل 1 ,5)، وهذا يُظهر أن كل قسم في الجناح محاط بعروق يُكوِّن

وحدة. أما النمط الإجمالي فينتج من تكرار هذه الوحدات المدْولية، التي يحوي كل منها بعض التفاوتات في حجم أو شكل الخطوط أو الشارات أو البقع الكامنة فيها.

تمتد الأنماط المتكرّرة في أبنية الجسم لتشمل التفاصيل الدقيقة التي يكاد لا يُرى بعضها بالعين المجردة. فمثلاً تتكوّن أنماط جناح الفراشة الجميلة في واقع الأمر من حراشف صغيرة جداً. كل حرشفة هي نتوء لخلايا وحيدة مجموعة في صفوف عديدة على الجناح. لكل حرشفة لونها المحدد، مثل خبطات فرشاة رسام على لوحة نقطية، وعند الجمع بينها في مجال يحتوي آلاف وملايين الحراشف، تعطي النمط الإجمالي الذي نعجب به. إن أنماط أجسام الأسماك والأفاعي والسحالي مكوّنة أيضًا من حراشف (مختلفة عن تلك الموجودة في الفراشات) مرتبة في نمط هندسي منتظم. وتعتمد خصائص الحراشف العاكسة أو الكاسرة للضوء على بنية تشريحية خلوية دقيقة تحّدد الطول الموجي للضوء المُمْتص أو المنعكس (الشكل 1 ,6).

انطلاقاً من قليل من التفاصيل فحسب، نستطيع إدراك مهمة النموّ الهائلة في بناء حيوانات كبيرة معقّدة بدءاً من خلية واحدة صغيرة. هناك ملايين التفاصيل، والتفاصيل يعتدّ بها. فحدوث تغيّر صغير في عملية مبكّرة يولّد تأثيرات لاحقة متعاقبة. ما هي إذن تلك العمليات التي باستطاعتها تركيب ديناصور ضخم وتلوين التفاصيل الدقيقة لبقعة على جناح فراشة أيضًا؟

إن وضعنا في الحسبان الاختلافات الهائلة في الحجم، والتنوّع العظيم في أشكال الحيوانات، ستبدو تفاصيل النموّ مثلما وصفها عالم



الشكل 3,1 المعمار المدْولي لحيوانين من العصر الكامبري. يظهر فصا الأقدام *آيشيا بيدنكولاتا* (*Ayshaeia pedunculata*) (فوق)، وثلاثي الفصوص *ألينويديس سيراتوس* (*Olenoides serratus*) (تحت) شكل جسم مدولي متكرّر ومنظم. (الصورتان تقدمة من شيب كلارك (Chip Clark) من معهد سميثسونيان).



الشكل 4,1 **التصميم المدْولي ليد الإنسان.** تظهر صورة الأشعة السينية لعظام الإصبع معماراً تسلسلياً متكرّراً. (تقدمة من جيمي كارول).

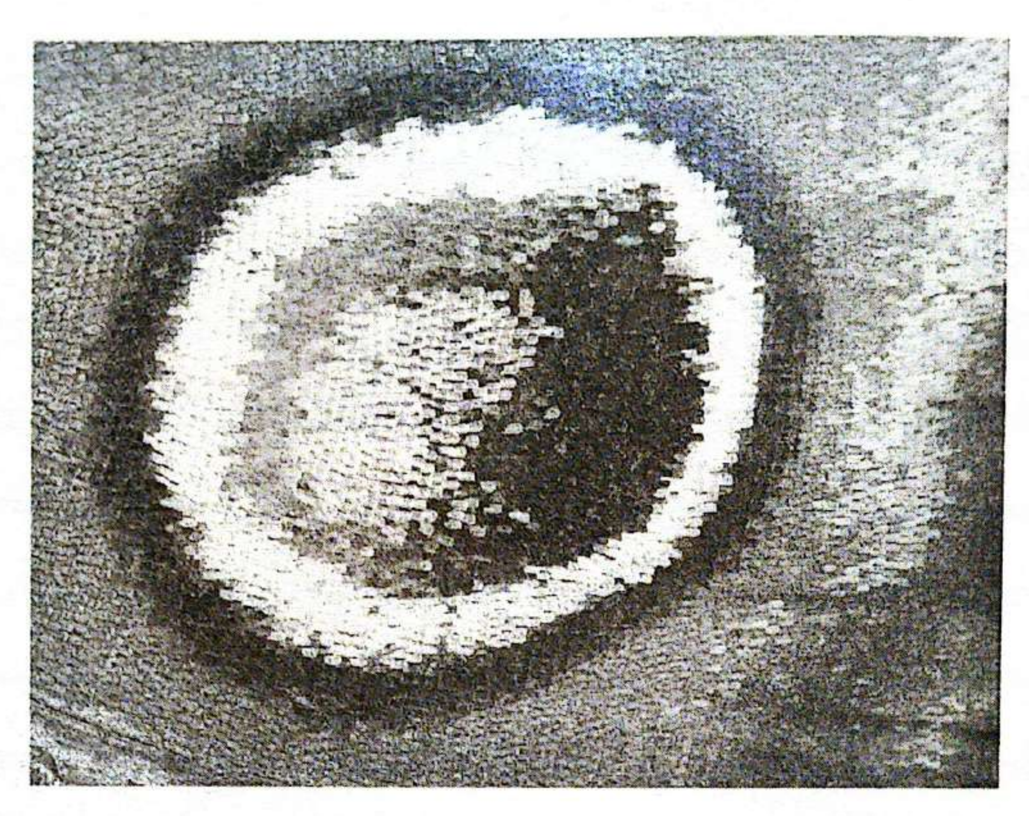
الأحياء الجزيئية جنتر ستنت (Günther Stent) قبل عشرين سنة: «كأنها حالات فردية لامتناهية، يعجز المرء عن اكتشاف رابط بينها». لكن علماء الأحياء فوجئوا وابتهجوا لاكتشافهم إمكانية صياغة تعميمات عن الشكل، ولُحسن الحظ فهذه التعميمات لا تقتصر فقط على المظهر الخارجي، بل تمتد عميقاً لتشمل الآلية الجينية للنموّ. سأبدأ بعرض التشابهات الخارجية، ممهداً الطريق إلى الجينات التي تقوم بالمهمة في الفصليين القادمين.

التطوّر باعتباره تفاوتاً في العدد والنوع

تعكس الجوانب المدْولية والتكرارية لتصميم الحيوان نظاماً ما في الأشكال الحيوانية. أدرك خبراء علم التشريح مبكراً أنّ الأجسام الحيوانية وأجزاءها تنشأ حسب ثيمات مُدركة، بغض النظر عن تنوّع مظهرها الخارجي. حدّد عالم الأحياء الإنجليزي وليام بيتسون (William Bateson) بعض هذه السمات بشكل منهجي منذ أكثر من قرن، وتبيّنت لاحقاً الفائدة العظيمة لمنظور بيتسون باعتباره إطاراً للتفكير في منطق تصميم الحيوان، وفهم كيف تطوّرت التفاوتات في الثيمات الأساسية.



الشكل 5,1 **تصاميم تسلسلية متكرّرة في أجنحة الفراشة.** كما تظهر في الجانب الأسفل من فراشة مورفو. يتكون كل جناح من وُحَيْدات تسلسلية متكررة محددة بعرقين وحافة الجناح. تحتوي الوُحَيْدات على العناصر نفسها من عُيينات، وأشرطة، وشارات، لكن تتفاوت هذه العناصر في كل وُحَيْدة. (الفراشة مهداة من نيبام باتل (Nipam Patel)، وصوّرتها جيمي كارول).



الشكل 6,1 **تكرار على حرشفة دقيقة.** تبدو حراشف جناح الفراشة كخبطات فرشاة على لوحة نقطيّة، تتكوّن كل خبطة من حرشفة واحدة بلون محدد، وتكوّن هذه الحراشف مجتمعة عناصر نمط هندسية. (صورة ستيف بادوك (Steve Paddock)).

لاحظ بيتسون أيضاً أن العديد من الحيوانات الكبيرة مركّبة من أجزاء متكرّرة، وأن كثيراً من أجزاء الجسم مكوّنة بدورها من وحدات متكرّرة. وظهر من خلال دراسة مجموعات حيوانية معينة أن أحد أوضح الاختلافات بين أعضاء مجموعة ما هو *عدد* ونوع البنى المتكرّرة. فعلى سبيل المثال، بينما تتشابه كل الفقاريات في امتلاكها عموداً فقرياً يُبْنى مدْولياً، ويتكوّن من فقرات مفردة، فإن الفقاريات المختلفة تمتلك أعداداً وأنواعاً مختلفة الفقرات. إذ يتفاوت كثيراً عدد الفقرات من الرأس حتى الذيل، من أقل من 12 لدى الضفادع، إلى33 عند الإنسان، وعدة مئات في الأفاعي (الشكل 7,1). توجد كذلك أنواع مختلفة من الفقرات مثل العنقية (cervical)، والصدرية (thoracic)، والقطَنية (lumbar)،

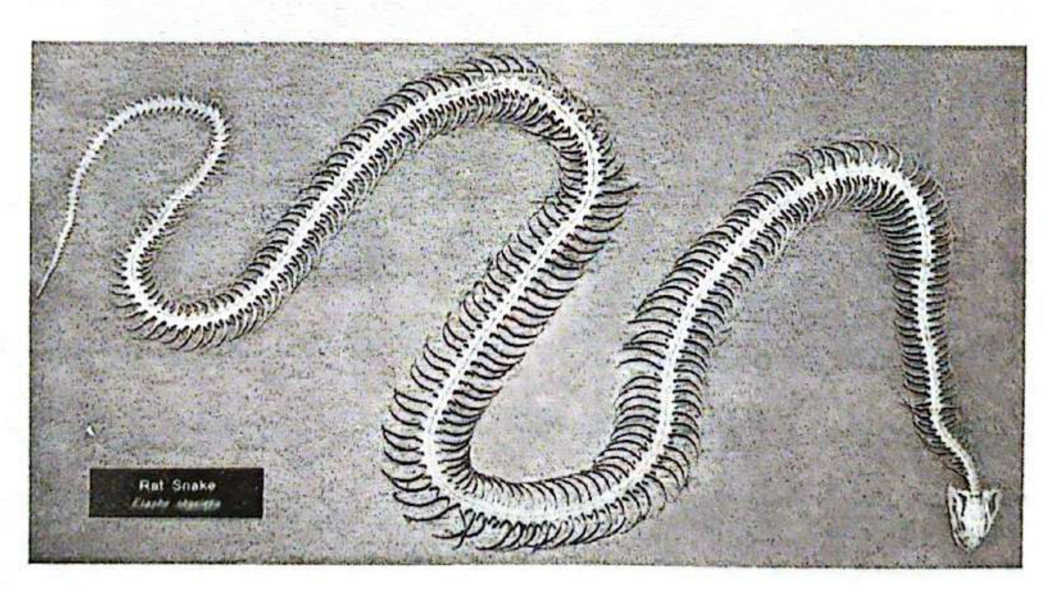
والعجُزية (sacral)، والذيلية (caudal). تتمايز هذه الأنواع في أي حيوان في حجمها، ومظهرها، وحضور أو غياب بنى تتصل بها كالضلوع. وهناك تنوّع كبير في عدد فقرات كل نوع في الفقاريات المختلفة.

ينطبق نمط مشابه على شكل وتنوّع مفصليات الأرجل. تتكوّن أجسام مفصليات الأرجل من فصوص متكرّرة، قد تتراوح في الجذع (خلف الرأس) من حوالي 11 فصاً في الحشرات إلى عشرات الفصوص في مئويات الأرجل (centipede) وألفيات الأرجل (millipede). وتتمايز مجموعات الفصوص بعضها عن بعض (مثلاً الفصوص الصدرية عن البطنية) في حجمها، ومظهرها، وخصوصاً بالزوائد التي تنتأ منها (على سبيل المثال يحمل كل فص صدري في الحشرات زوجين من الأرجل، بينما لا يحدث هذا في الفصوص البطنية).

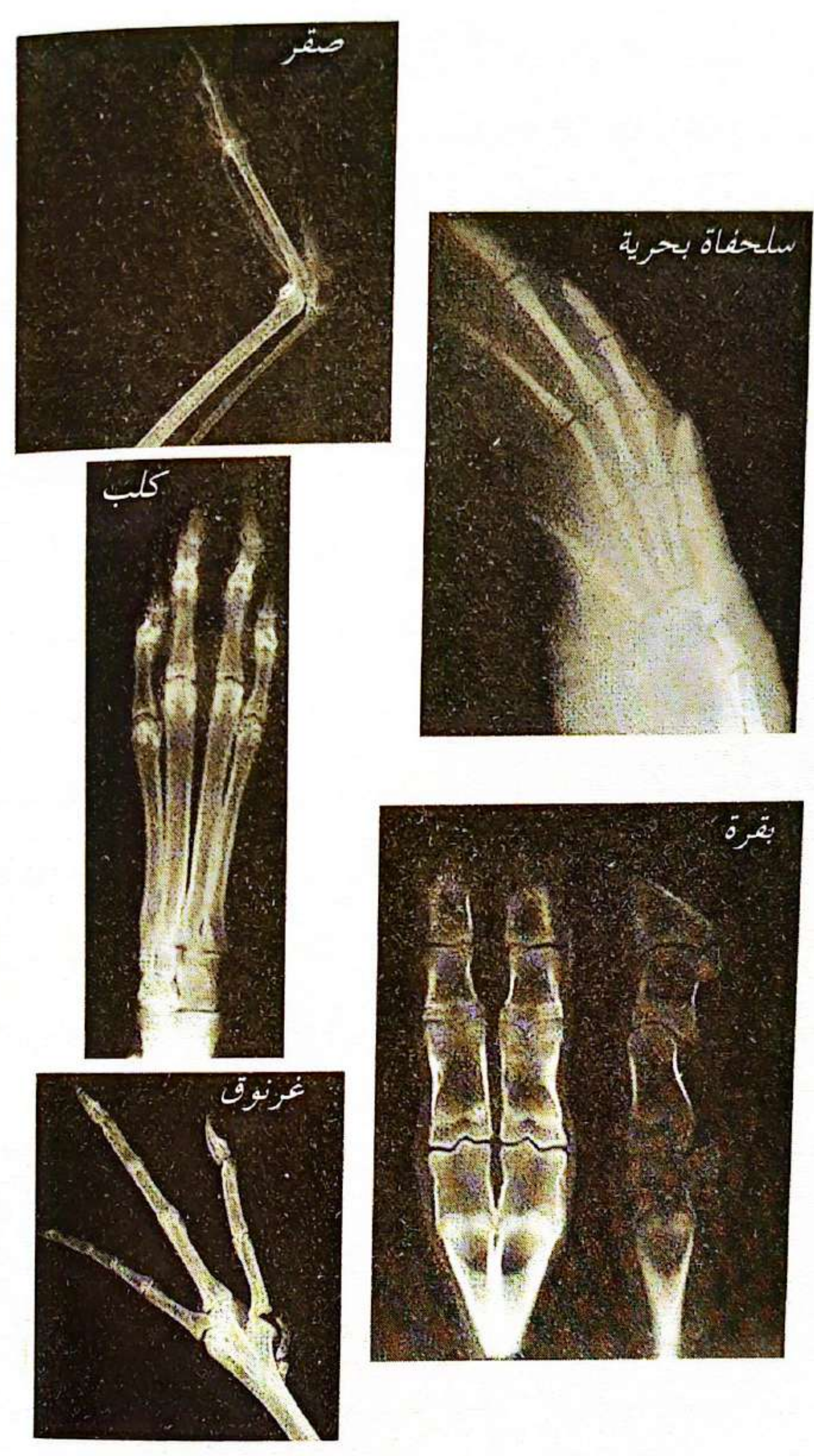
استغلّت هاتان المجموعتان الحيوانيتان (مفصليات الأرجل والفقاريات) جميع بيئات الأرض (ماء، يابسة، هواء) بنجاح، وهما أكثر الحيوانات تعقيداً على مستوى التشريح والسلوك. تتكوّن كلتا المجموعتين من تجميع متكرّر لأجزاء متشابهة. هل هناك صلة بين مدْولية التصميم والنجاح في التنوّع التطوّري؟ أعتقد ذلك دون ريب. إنّ التحدي الذي يواجه علماء الأحياء هو اكتشاف كيف بُنيت هذه الحيوانات بدءاً من خلية واحدة، وكيف تطوّر كل هذا التنوّع في تصميم الجسم. يعطي البناء المدْولي في الفقاريات ومفصليات الأرجل، وتنوّع هذا البناء في عدد ونوع المداول، تلميحات مهمة عن العمليات الكامنة خلفها.

إنّ أجزاء الجسم التي تُبنى عادة مدولياً من وحدات متشابهة تتفاوت نوعاً وعدداً تفاوتاً كبيراً بين أنواع الحيوانات. إذ يتراوح عدد الأصابع في

أطراف أغلب الفقاريات ذات الأربع أرجل من إصبع إلى خمس أصابع، ونلحظ خمسة أنواع متمايزة من الأصابع على يديْنا (إبهام، سبابة، إلخ) ورجليْنا. إنّ التشابهات بين هذه الأصابع واضحة، أما الاختلافات فهي مسألة حجم وشكل. لقد تأقلمت أطراف مجموعة رباعيات الأقدام (tetrapods) على أداء وظائف عديدة عبر تصاميم متنوّعة جداً، ولقد استمرّ تصميم الأصابع الخمس الأساسي أكثر من 350 مليون سنة على الرغم من أن عدد الأصابع قد تطوّر على نطاق واسع إلى درجة وجود حيوانات تراوح عدد أصابعها من إصبع واحد إلى خمس (على سبيل المثال للجمل إصبعان في قدمه، بينما لوحيد القرن ثلاث، إلخ). إن التنوّع في ثيمة رباعيات الأقدام مذهل، وهذا ما تبرزه الأشعة السينية في عيّنة من الفقاريات (الشكل 1, 8). ومن المثير للاهتمام أن الحيوانات ذات القرابة الكبيرة يمكن أن تتباين بشدة، فبعض المجموعات التصنيفية طوّرت أنواعاً عديدة تختلف فيما بينها في عدد الأصابع.



الشكل 7,1 **هيكل عظمي لثعبان.** تكوّن مئات من الفقرات والضلوع المتكررة شكل جسم الثعبان. (تقدمة من د. كيرت سلادكي (Kurt Sladky) من جامعة وسكُنسن.



الشكل 8,1 التنوّع في أشكال أطراف الفقاريات. كل أطراف الفقاريات عبارة عن تفاوتات في تصميم مشترك، حيث يختلف عدد العناصر المكّونة للطرف وحجمها وشكلها (كالأصابع مثلاً). (تقدمة من د. كيرت سلادكي من جامعة وسكُنسن، صورة سلحفاة البحر تقدمة من د. كريج هارمس (Craig Harms) من جامعة ولاية نورث كارولينا).

التنادُد، والتنادُد التسلسلي، وقانون ويليستون

عند مقارنة أعضاء الجسم بين أنواع مختلفة، من المهم معرفة إن كانت المقارنة تتم بين جزء الجسم ذاته الذي ربما تغير بعدّة طرق، أو أنها تتم بين أجزاء في سلسلة، حيث إن علاقة هذه الأجزاء بعضها ببعض قد تكون غامضة. على سبيل المثال، الأطراف الأمامية للسمندرات، والصوروبودات، والفئران، وأذرعنا *متنادِدة*[1] (homologs)؛ أي أن ذات البناء تم تعديله بطرق مختلفة في كل نوع. لقد اشتقَّت جميع هذه الأطراف من طرف أمامي مشترك كان سلفاً للجميع. والأطراف الخلفية، أرجلنا والأرجل الخلفية في الفقاريات رباعية الأقدام، متنادِدة أيضًا. وبالنسبة إلى الأطراف الأمامية والخلفية، فإنها تعتبر *متنادِدة تسلسلياً* (*serial homologs*)، أي بنى ظهرت بمثابة سلسلة متكرّرة، ثم تمايزت لدرجات متفاوتة في حيوانات مختلفة. وتمثل الفقرات والضلوع المرتبطة بها، والأطراف الأمامية والخلفية في رباعيات الأقدام، والأصابع، والأسنان، وأجزاء الفم، وقرون الاستشعار، وأرجل المشي في مفصليات الأرجل، والأجنحة الأمامية والخلفية للحشرات نماذج للتنادُد التسلسلي.

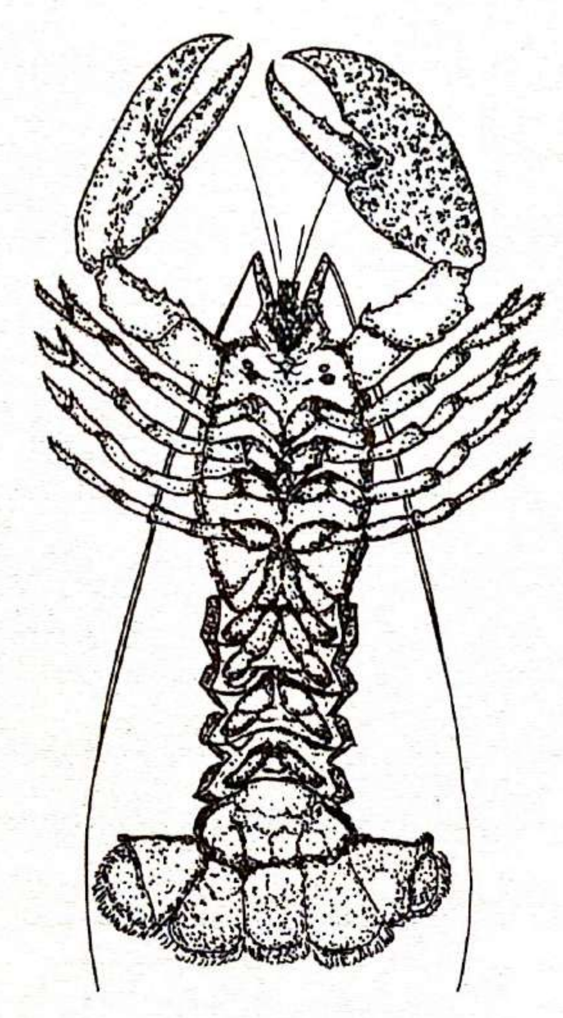
إنّ التغيرات في عدد ونوع الأعضاء المتنادِدة تسلسلياً ثيمة أساسية في تطوّر الحيوان. سأقرب الأمر من خلال طرح مثالين عن بنيتين مألوفتين. إن كنتَ من عشاق المأكولات البحرية، فلربما خضت تجربة

(1) التنادد (Homology) يعني الابتعاد بعد اجتماع وفي مادة «ندد» من لسان العرب تجد أن الند هو الضد والشبيه وهو يتفق مع المعنى الأحيائي الذي يحيل إلى أعضاء ذات أصل واحد لكنها بفعل الزمن تغيرت وابتعدت عن شكلها الأول. المترجمان

تمزيق جراد البحر (lobster)، ولاحظتَ التصميم المدولي وتعجّبت من التنوّع الكبير لزوائد الجسم (الشكل 1,9). هناك جوانب عدة في بناء جراد البحر تعكس الثيمات العامة المدولية والتنادُد التسلسلي. أولا: ينقسم الجسم إلى رأس (فيه العينان وأجزاء الفم)، وصدر (فيه أرجل المشي)، وذيل طويل (ولذيذ). ثانيا: تحتوي أجزاء الجسم المختلفة على زوائد متخصصة (قرون الاستشعار، مخالب، أرجل المشي، أرجل العوم). ثالثا: تنقسم الزوائد المفصلية إلى فصوص، وتحتوي أنواع الزوائد المختلفة على أعداد متباينة من الفصوص (قارن المخلب برجل مشي). إنْ شعرت بروح المغامرة وشرّحت حشرة أو سرطان البحر فستلاحظ بعض التشابهات العامة في التعضّي والتفصيص وزوائد الجسم، وستلاحظ أيضًا اختلافات في عدد ونوع البنى المتنادِدة تسلسلياً.

سيكون المثال الثاني للأجزاء المتنادِدة تسلسلياً هو الأسنان التي فرمت وطحنت بها جراد البحر. يحتوي فكّانا على أنواع مختلفة من الأسنان (أنياب، ضواحك، قواطع، أرحاء ... إلخ)، ويمثل الاختلاف في نوع وعدد الأسنان أحد الاختلافات البيّنة بين أنواع الفقاريات. على سبيل المثال تحتوي الزواحف البدائية، مثل تلك الأشكال الضخمة التي عمرت البحر، على فم مليء بالأسنان المتشابهة إلى حدّ بعيد، لكن الأنواع التي ظهرت لاحقاً طوّرت أنواعًا مختلفة من الأسنان تأقلمت على عض، وتمزيق، وكبس الطعام. تعكس الأسنان المختلفة اختلافات في نوع الغذاء، حيث للحيوانات اللاحمة قواطع وأنياب، بينما تمتلك الحيوانات آكلة الأعشاب أرحاءً عادةً (الشكل 1,10). نختلف بدورنا

عن أقاربنا الرئيسيات في الأسنان (الشكل 1 ,11). ولربما علمتَ أنّ الأسنان تنتج أحافير صلبة، وقد لعبت بعض الاكتشافات في هذا المجال دوراً رئيساً في كشف هوية ونمط حياة أسلافنا.

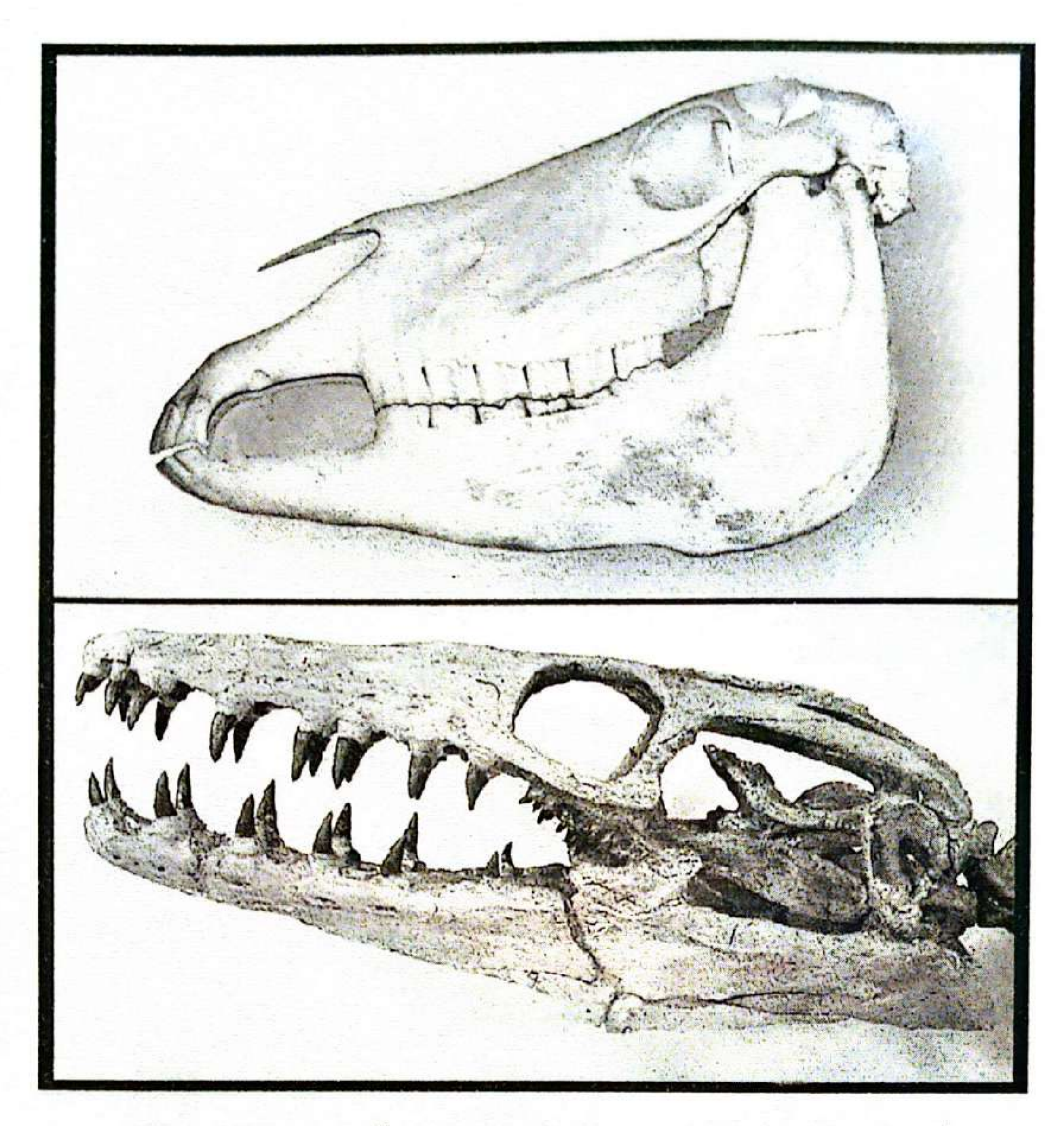


الشكل 9,1 **التنوّع المتكرّر تسلسلياً لزوائد جراد البحر.** قرون الاستشعار، والمخالب، وأرجل المشي، وأرجل العوم، والذيل هي تعديلات على تصميم طرف مشترك. (رسم جيمي كارول).

إن النزعات التطوّرية في عدد وأنواع الأبنية المتكرّرة واضحة جداً حتى أن عالم الأحافير صموئيل ويليستون (Samuel Williston) أكد في عام 1914: «إنه (أيضًا) قانون في التطوّر، أن تميل أجزاء الكائن الحي

إلى تقليل عددها لصالح أجزاء أكثر تخصصية على مستوى الوظيفة».

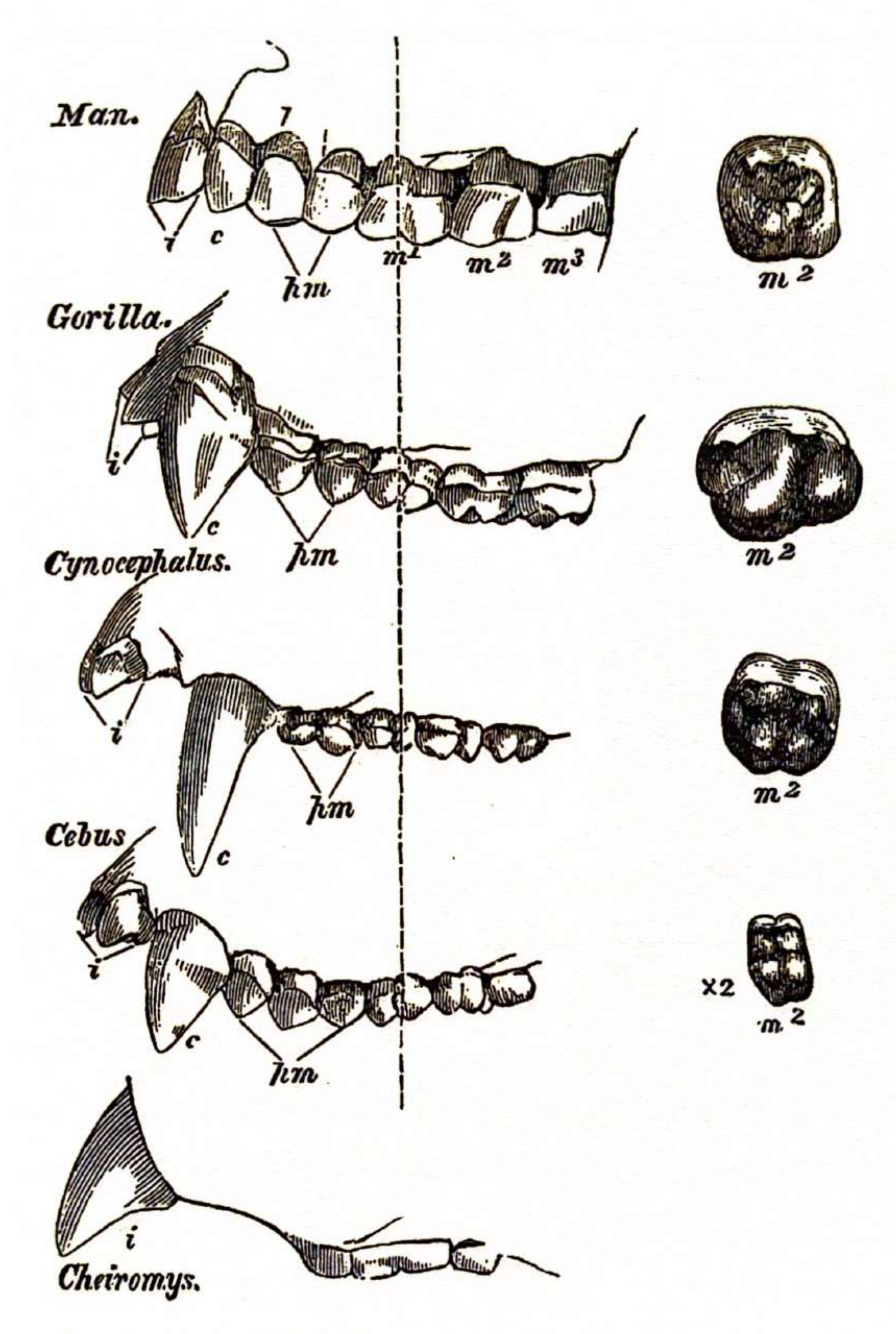
لقد درس ويليستون زواحف البحر القديمة، ولاحظ أن المجموعات القديمة اتسمت خلال التطوّر بأعداد كبيرة من الأجزاء المتكرّرة تسلسلياً، لكن المجموعات اللاحقة قلّصت هذه الأعداد لمصلحة أشكال ذات تخصصية أكبر. كذلك فإنه نادراً ما تحوّلت الأنماط المتخصصة إلى أنماط أقل تخصصية. وتوفّر الأصابع مثالاً مثيراً، فعند ظهورها لأول مرة في مجموعة رباعيات الأقدام كان هناك ما يصل إلى ثمانٍ في كل قدم، لكن لم يكن بين هذه الثماني أكثر من خمسة أنواع فقط. قُلِّصت هذه الأصابع لاحقاً إلى خمس أصابع متخصصة، أو قلصت أكثر في أنواع لاحقة. قليلة هي القوانين في علم الأحياء، وتلك التي تجرّأ العلماء على تسطيرها كُسرت غالبا من قبل بعض الكائنات الحية. لكن يظل قانون ويليستون ملاحظة مهمة تبدو منسجمة مع سمات كائنات أخرى غير زواحف البحر القديمة التي كتب عنها. وتبدو النزعة العامة كالتالي: بعدما يتضاعف عدد الأجزاء المتناددة تسلسلياً، تتخصص وظيفياً ويتقلّص عددها. إن تخصص أشكال الفقرات والأسنان والأصابع في الفقاريات، والأرجل والأجنحة في مفصليات الأرجل كان مصحوباً بتقلص في أعداد هذه البنى المتكررة. يظهر أن بيتسون وويليستون قبضا على بعض الحقائق البسيطة المتعلّقة بتصميم الحيوان والتطوّر، ومكننا ذلك من اختصار التاريخ الشاسع لأكبر وأكثر المجموعات تنوعاً في بعض التعميمات.



الشكل 10,1 **الأسنان في حيوان فقاري بدائي.** تبدو كل أسنان الموزاصور (mosasaurs) (تحت) متشابهة غالباً، بينما تمتلك الفقاريات اللاحقة (فوق، صورة حصان) أنواعاً متمايزة من الأسنان. (إعادة تشكيل *بلاتيكاربوس بلايفرونز Platecarpus Plaifrons*)، تقدمة من مايك إيفرهارت (Mike Everhart) من الموقع الإلكتروني Oceans Of Kansas (Paleontology

التناظر والقطبية

إضافة لتكرار التصميم المدولي، تظهر على الأجسام والأعضاء الحيوانية سمتان أخريان: التناظر (symmetry) والقطبية (polarity).



الشكل 11,1 **تنوّع الأسنان في الرئيسيات.** تختلف الرئيسيات في عددالأنياب والضواحك والأرحاء وأشكالها. (أخذت الصورة من كتاب ت. هـ. هكسلي [دليل حول موقع الإنسان في الطبيعة] المنشور عام 1863).

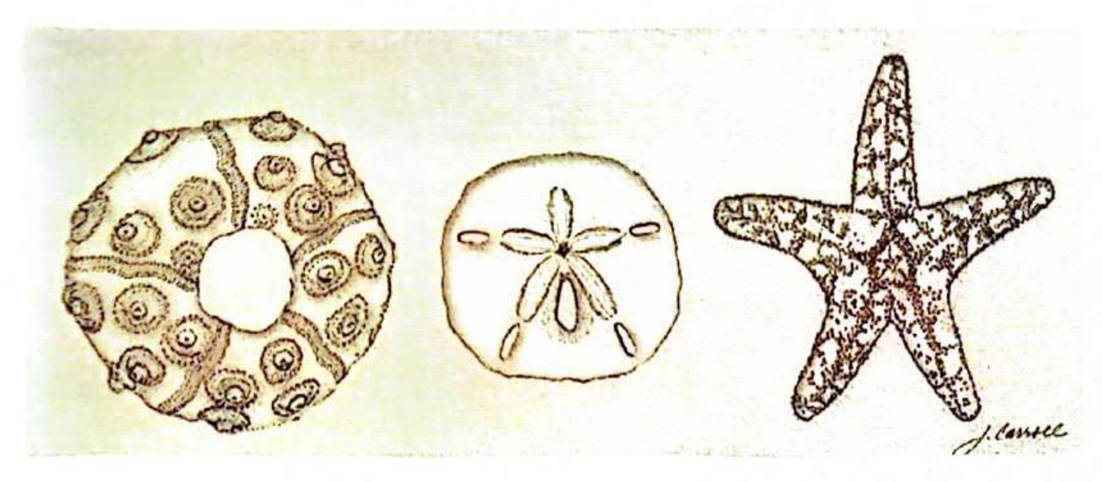
أغلب الحيوانات المألوفة لدينا متناظرة جانبياً بحيث تمتلك جانبين، أيمن وأيسر، متشابهين يتناظران حول محورٍ مركزي يقسم الجسم على طول محوره الأطول. يفرض هذا التصميم أيضاً جهة أمامية وخلفية في جسم الحيوان، ما مكّن من تطوّر عدة أساليب فعالة للتنقّل. تظهر بعض الحيوانات تناظرات أخرى مثل شوكيات الجلد (echinoderms) المتناظرة حول خمسة محاور وهي مجموعة تضم قنفذ البحر (sea urchin)، ودولار الرمل (sand dollar)، وأنواعاً أخرى مذهلة (الشكل 1 ,12). وتوفّر محاور التناظر في حيوان مؤشّرات على كيفية بناء الحيوان عموماً.

ينطبق ما قيل عن التناظر في جسم وأجزاء الحيوان على القطبية. توجد ثلاثة محاور للقطبية في أغلب الحيوانات: من الرأس إلى الذيل، من الأعلى إلى الأسفل (من الخلف إلى الأمام في حالتنا باعتبارنا منتصبين)، من القريب إلى البعيد (إشارة إلى البنى الناتئة من الجسم الرئيسي مثل الأطراف المنتظمة عمودياً على الجسم الرئيسي). وتتسم البنى المفردة بالقطبية أيضًا. فكر باليد التي تحتوي على ثلاثة محاور: من الإبهام إلى الخنصر، ومن ظاهر اليد إلى باطنها، ومن المعصم إلى أطراف الأصابع.

كيف يشفّر الشكل في الجينوم؟

إن المدولية، والتناظر، والقطبية ميزات عامة تقريباً في تصميم الحيوان، وهي بارزة في الحيوانات الأكبر والأكثر تعقيداً مثل الفراشات والحمر الوحشية. تشير هذه الميزات والنزعات التطوّرية التي لاحظها

ويليستون وبيتسون إلى وجود نظام ومنطق في معمار الحيوان. ويوحي ذلك بوجود «قواعد» عامة تحت هذا التنوّع العظيم في الأشكال الحيوانية ينبغي اكتشافها لمعرفة كيف تبنى وتتطوّر الحيوانات.



الشكل 12,1 **أشكال حيوانية متناظرة أخرى.** شوكيات الجلد كقنفذ البحر (يسار)، ودولار الرمل (وسط)، ونجم البحر (يمين) متناظرة شعاعياً. (رسم جيمي كارول).

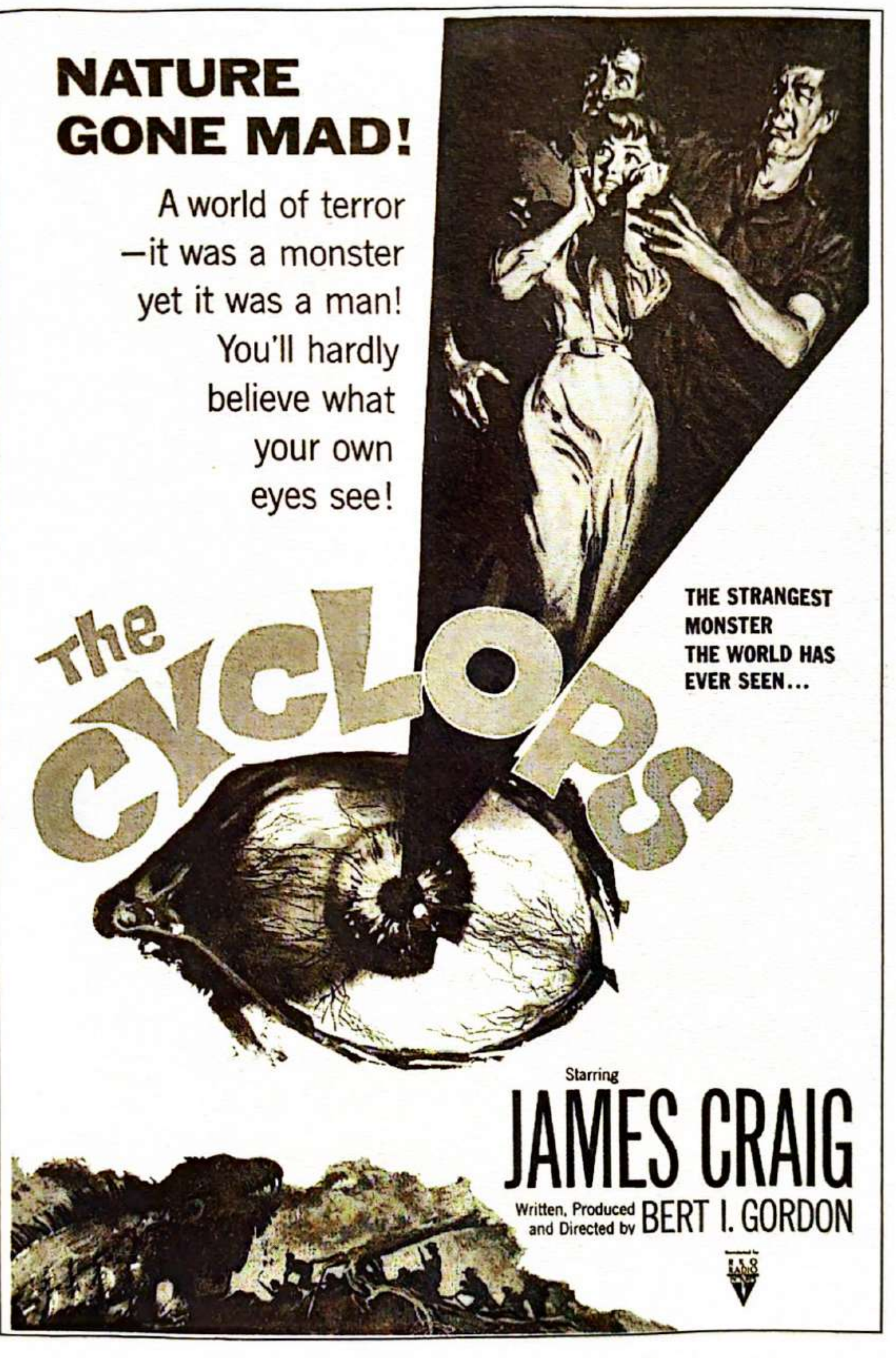
سأركز في هذا الكتاب على أربعة أسئلة رئيسية:

1. ما هي أهم «القواعد» الرئيسية لإنتاج شكل حيواني؟
2. كيف تشفّر المعلومات الخاصة بالأنواع لبناء الشكل الحيواني؟
3. كيف يتطور التنوّع؟
4. ما الذي يشرح النزعات واسعة النطاق في التطوّر، مثل التغيّر في عدد الأجزاء المتكرّرة ووظائفها؟

أين نبحث عن هذه القواعد والتعليمات؟ في الدنا، في مجموعة الدنا الكاملة (الجينوم) للنوع الحي، حيث تكمن المعلومات اللازمة لبناء ذلك الحيوان. إنّ تعليمات صنع خمس أصابع، أو بقعتين دائريتين على

جناح فراشة، أو ست أرجل، أو شرائط بيضاء وسوداء، مشفّرة بطريقة ما في جينومات الأنواع الحاملة لهذه الصفات. هل يعني هذا وجود جينات للأصابع، وأخرى للبقع، وأخرى للشرائط، إلخ؟ سأركز في الجزء الأول من الكتاب على كيفية تشفير البنية التشريحية للجسم في الجينوم.

سأعالج في الجزء الثاني من الكتاب التنوّع التطوّري. بطريقة ما تمتلك بعض الأنواع ثلاث أصابع مقابل أربع لدى أخرى، بقعتين مقابل سبع عُيينات على أجنحة الفراش، ست أرجل مقابل ثمانٍ، أو جسم أسود بالكامل مقابل أبيض؛ لا بد من وجود تعليمات مختلفة مشفرة في دنا هذه الأنواع. التطوّر بهذا المعنى يغدو بأكمله مبحثاً جينياً. لكن لنفهم كيف تنحت الجينات جمال الحيوانات الآسر، يجب أن نلقي نظرة على بعض الوحوش لنرى بعض الأدلة الحاسمة.



ملصق لفيلم ذا سايكلوب *The Cyclops* (1956). (مؤسسة بي أند إتش بردكشن. كل الحقوق محفوظة).

الفصل 2

وحوش
وطافرات
وجينات حاكمة

- «هل تعرف أنني طالما اعتقدتُ أن أحادي القرن وحش خرافي أيضاً؟ لم أشاهد واحداً منه أبداً من قبل».

قال أحادي القرن: «حسناً، بعد أن رأى أحدنا الآخر الآن، إذا اعتقدت بوجودي سأعتقد بوجودك، أليست تلك صفقة رابحة؟»

لويس كارول (Lewis Carroll)
[من خلال الزجاج]

(1872) ***Through the Looking Glass***

كان مسلسل «المخلوق» *CREATURE FEATURE* هو البرنامج التلفزيوني الأشهر الذي يعرض عصر السبت أيام طفولتي. وكان صديقي المقرّب ديف مهووساً به، ويستقبله بطقسه المعهود فيتمترس في القبو، مطفئاً الأضواء، ومسدلاً الستائر، ومُسنداً مختلف الأغراض إلى الأبواب والنوافذ، وبجواره مضرب البيسبول تحسباً لزيارة أحد

هذه الوحوش خلال العرض، ثم يقضي ساعات في مشاهدة جودزيلا أو دراكولا أو المومياء أو ما هو أسوأ من ذلك، ويعمد لاحقاً إلى سرد الأحداث عاقداً المقارنات بين قوى هذه الوحوش وطاقاتها الفريدة. توشك هذه المخلوقات أن تتجسد حقيقةً أمامه بما له من خيال خصب، ناجم على الأرجح عن وعاء الفشار سعة خمسة جالونات وعلبة كريما بيتي كروكر.

إنّ شغفنا بالرعب الذي تخلقه الوحوش مشترك وقديم، فقد صوّر الكُتّاب، منذ الميثولوجيا الإغريقية وحتى أفلام هوليود المنخفضة التكلفة، مختلف أنواع المخلوقات العملاقة والغولية والهجينة. بالنسبة لي لم أشارك ديف شهيته المفتوحة لأفلام الوحوش (أو علب الكريما في ارتباطها بهذه الأفلام على الأقل)، لكن الوحوش لعبت دوراً مهماً في تقدّم علم الأجنة، فمن أنجح المقاربات لفهم كيفية نموّ الأشكال نمواً سليماً دراسة وحوش عجائبية تمتلك عدداً خاطئاً من الأجزاء، أو أن أجزاءها في مواقع غير صحيحة. بعضها كان نتيجة لتدخّل بشري، وبعضها الآخر بسبب حادث أو أذيّة خلال فترة الحمل، وبعضٌ ثالث بسبب طفرات (mutations) نادرة تحدث في الطبيعة. لقد أدت مؤخراً المعرفة المكتسبة من دراسة هذه الوحوش إلى كشف آليات معينة تقبع خلف تجميع وتركيب أجسام الحيوانات وأجزاء الجسم المختلفة.

الصقلوب بين الحقيقة والخيال

لم يتقبّل عقلي أبداً حكايات الموتى العائدين إلى الحياة، أو البشر المتحولين إلى خفافيش أو ذباب، أو الغوريلات الضخمة ضخامة

ناطحات السحاب، أو المخلوقات التي يظهر نصفها بشري ونصفها الآخر حصان أو ماعز أو أفعى أو سمكة أو أي شيء آخر، أو تلك التي تنفث النار أو تملك أجساماً خفية. لقد وضعتها جميعاً في قائمة الخرافات، وفعلت الأمر نفسه مع ذلك الوحش ذي العين الواحدة في وسط الرأس، لكن هنا تحديداً لعلي تسرّعت في استبعاد وجود مخلوق ما.

في حين كانت معرفتي ضبابية بأسطورة الصقلوب (Cyclops)، كنت أجهل تماماً أن وجود حيوان بعين واحدة وسط الرأس معروف وموثّق علمياً، ففي إحدى الفترات كانت حوالي 5 إلى 7 بالمائة من الخراف المولودة في يوتا Utah مصابة بالتصقلب (cyclopia) وهو تشوّه خَلقي مميت يخرج فيه الجنين بعين واحدة في المركز ومفتقراً إلى أغلب أجزاء الفك والأنف، كما يظهر نصفا الكرة المخية غير مكتملين (الشكل 1,2) وهو ما يعرف علمياً باندماج مقدَّم المخ (holoprosencephaly). إن السبب الرئيسي لهذه العيوب هو فشل فص الدماغ الأمامي والعينين في الانفصال إلى قسمين متناظرين.

أُكتشف أخيراً أن نسبة الظهور العالية للتصقلب تعود لوجود نبات، زنبق *فيراترم كاليفورنيكوم* (*Veratrum californicum*)، في مراعي أمهات هذه الخراف. إن تناول هذا النبات خلال فترة الحمل (قرابة اليوم الرابع عشر) مثّل عاملاً حاسماً في هذا التأثير. واتضح أن النبات ينتج مادة كيميائية سميت بالسايكلوبامين (cyclopamine) ذات تأثير ماسخ (teratogenic) على نموّ الجنين.



الشكل 1,2 **حمل مصقلب**. يحدث بسبب تعرّض الأم في فترة حاسمة من الحمل لمادة السايكلوبامين وهي مادة سامة تنتجها نبتة *فيراترم كاليفورنيكم*. (الصورة تقدمة من د. لين جيمس (Lynne James)، مركز أبحاث النباتات السامة، لوجان، يوتاه).

ينتمي السايكلوبامين إلى مجموعة مواد كيميائية تعرف بالماسخة (teratogens)، وهي مواد تملك تأثيرات وخيمة على نمو الجنين. ولعل عقّار الثاليدومايد (thalidomide) الذي طُوّر في الأصل لعلاج الغثيان خلال الحمل أسوأها سمعة، إذ سبّبَ آلاف العيوب الخلقية لدى مواليد البشر في أواخر خمسينيات وبداية ستينيات القرن العشرين. ورغم أن هذه الجزيئات معروفة منذ عقود، إلا أنه لم يتم إحراز أي تقدّم حول آليات عملها حتى التقى مؤخراً علما الأجنة والأحياء الجزيئية، حيث

أُحرزَ التقدّم المعرفي من تجارب أدق وخاصة تلك التي قامت على التلاعب بنموّ الأجنة والجينات.

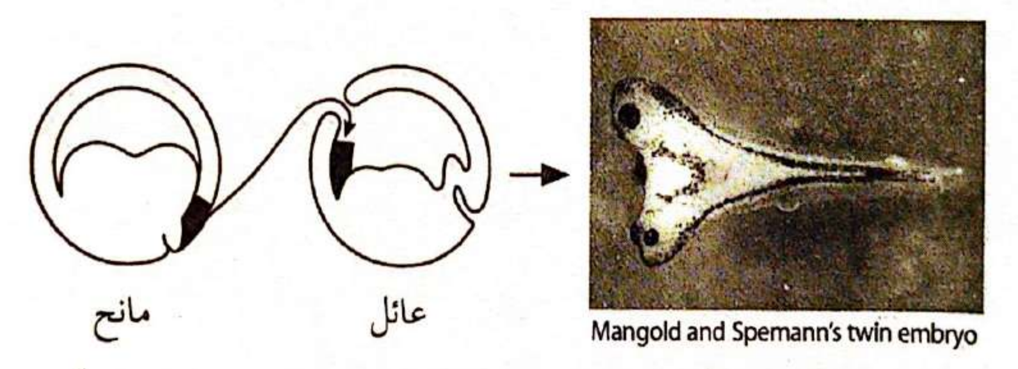
شفاه سمندل الماء وأجنحة الدجاجة

عمد علماء الأحياء خلال القرن الماضي إلى استخدام المشارط والإبر والملاقط وكل أنواع الأدوات الأخرى لتقطيع وخنق وحرق وخلط ومخض ووخز الأجنة في محاولة لاكتشاف قوانين بناء الحيوان. واعتمد رواد علم الأجنة اعتماداً كلياً على أساليب مادية من أجل تحريك وإزالة الخلايا ثم مراقبة تأثير ذلك على نمو الجنين، وأنتج هذا التعذيب القاسي وحوشاً مدهشة، كشفت ميزاتها الفريدة عن بضعة قوانين مركزية تتحكّم في عملية نموّ الحيوانات.

كان هانس سبيمان (Hans Spemann) في طليعة هؤلاء الروّاد، وأول عالم أجنّة يحرز جائزة نوبل، والوحيد خلال أكثر من ستين عاماً (لكن وكما سنرى لاحقاً، تمكّن علماء الأجنة مؤخراً من اللحاق بالركب). من التجارب الكاشفة التي أجراها سبيمان محاولته معرفة إذا ما كانت أول خليتين في جنين سمندل الماء (newt) تحملان خواص مختلفة أو متشابهة. استعمل سبيمان شعرة طفل دقيقة، أخذها من ابنته، لربط جنين من الوسط بُغية فصله إلى نصفين، فنما كل قسم إلى شرغوف (tadpole) طبيعي، مظهراً أن نصفيْ جنين البرمائيات في مراحله المبكرة يمكن أن يعطيا حيوانين متطابقين تماماً.

وعندما فصل سبيمان البويضة بطريقة مختلفة عبر ربطها عمودياً على الأخدود الفاصل بين خليتي الجنين، تحصّل على نتيجة مختلفة جداً.

نما أحد النصفين إلى شرغوف طبيعي فيما نما الآخر إلى كومة فوضوية من النسيج البطني. أدّى هذا أخيراً إلى تحديد منطقة في الجنين مهمة وضرورية في عملية تنظيم بنائه سميت بالشفة الظهرية[1] (dorsal lip) لمسام الأرومة[2] (blastopore)، وعند إزالتها نما الجنين إلى كتلة نسيج رخوة تفتقر إلى البنى التي تتشكل عادة في الجزء العلوي (الظهري) من الحيوان. والأكثر إدهاشاً أنه عندما نقلت منطقة الشفة الظهرية وزرعت في المنطقة التي ستصبح بطناً عند جنين آخر، تكوَّن محور جنيني جديد وانتهت العملية بظهور جنينين متلاصقين (الشكل 2,2) أطلق سبيمان على هذه المنطقة اسم «المعضّي»[3] (organizer)، إذ لاحظ أنها تُعضّي الجزء الظهري للجنين ليشكل الأبنية العصبية كما يمكنها إطلاق عملية نموّ محور جنيني جديد.



الشكل 2,2 **تحريض تكّون محور وجنين ثانٍ في جنين ضفدع.** زرع نسيج «معضٍّ» في موقع مختلف يستحث تكوين جنينين ملتصقين. (الصورة تقدمة من هيروكي كورودا (Hiroki Kuroda) وإدي دي روبرتس (Eddy De Robertis)، جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس).

---

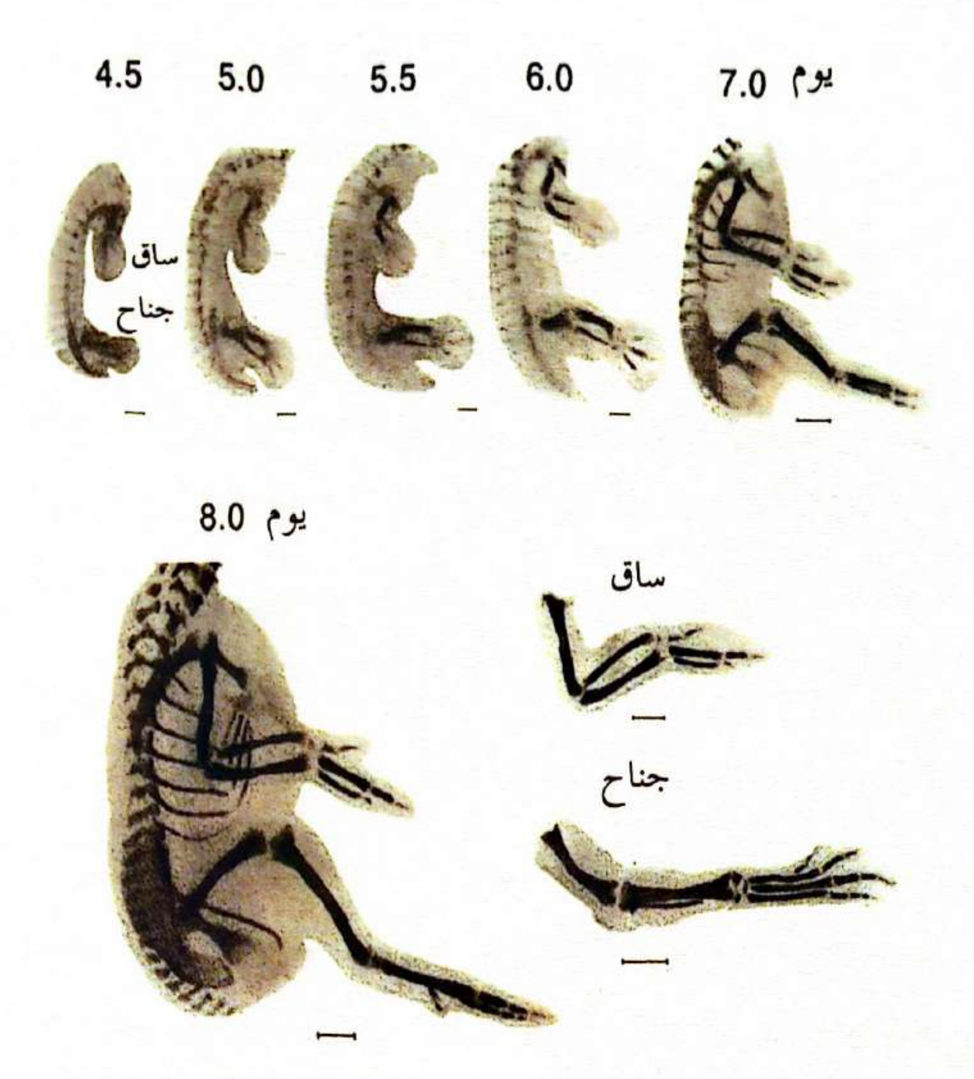
(1) المنطقة العلوية أو الظهرية من مسام الأرومة، كامبل. المترجمان

(2) فتحة في مرحلة من مراحل نمو الجنين تنمو إلى فم عند أوليات الفم وإلى شرج عند ثانويات الفم، كامبل بتصرف. المترجمان

(3) التعضي (organization) هو تحول النسيج البسيط إلى نسيج معقد أو عضو ذي وظيفة، والمعضي بهذا المعنى هو صانع العضو. المترجمان

كشفت التأثيرات الحيوية لمعضّيات سبيمان (Spemann organizer) عن تعليمات أحادية الاتجاه تُستحدث في أثناء عملية النموّ تبعاً للتفاعلات بين جزء معين من الجنين وأجزائه الأخرى. واكتشفت معضّيات أخرى تحمل خواص دراماتيكية، جميعها تُظهر أن هذه القاعدة تعمل في مختلف مستويات النمو: على مستوى الجنين بأكمله أو داخل أحد أعضائه أو حتى عند النزول إلى التفاصيل المعقّدة للأنماط. لنلقِ نظرة على اثنين من هذه المعضّيات لتوضيح نشاطاتها.

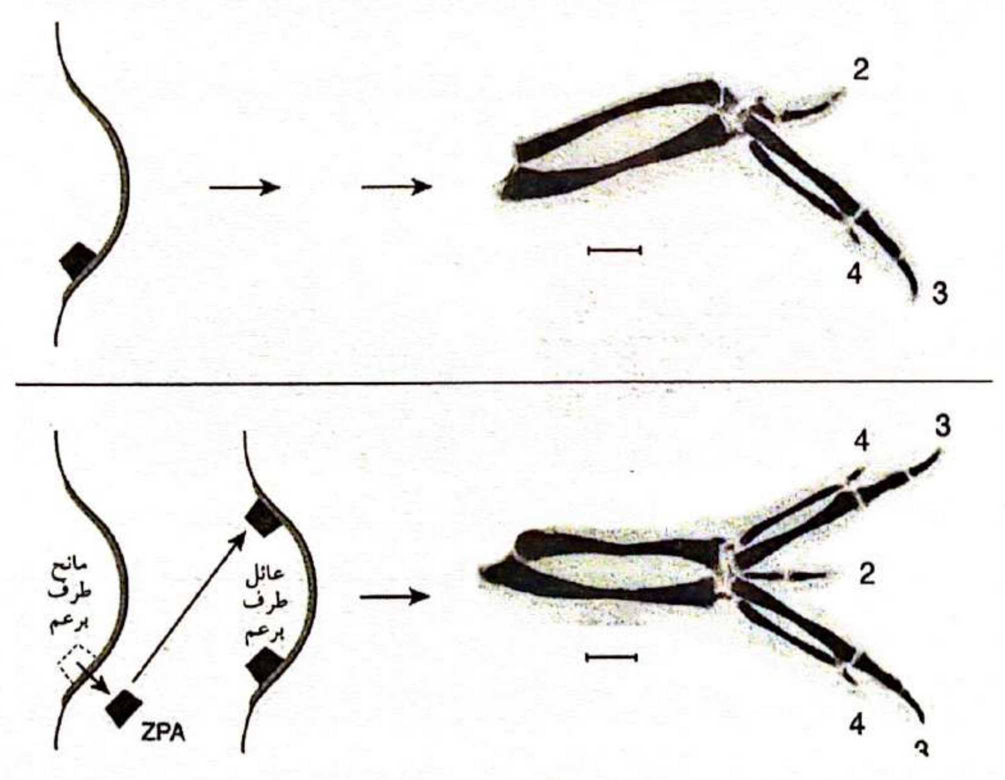
استولى تكوّن الأطراف على إعجاب علماء الأجنة مطولاً، إذ يأخذ الطرف شكله النهائي عبر عدة مراحل منطلقاً من مجرد برعم صغير في خاصرة الجنين في بداية عملية النموّ. يبلغ طول هذا البرعم في جنين الدجاجة الذي يبلغ عمره ثلاثة أيام حوالي مليميتراً واحداً وعرضه مليميترًا آخر، لكنه يكون قد تضاعف أكثر من ألف مرة في اللحظة التي تفقس فيها البيضة. وبين هاتين المرحلتين تنمو وسادة الأنسجة الصغيرة إلى الخارج وتطول ثم تُطوّر عظماً وغضروفاً وعضلات وأوتاراً (tendons) وأصابع (digits) وريشاً في عرض شيق للخطوات المتناسقة لعملية النمو. ولعل التكوّن النظيم للغضروف (والذي سيستبدل لاحقاً بالعظم) هو أكثر هذه الخطوات إدهاشاً، إذ يتشكل الغضروف حول تكاثفات الخلايا ويصطف بانتظام من الكتف إلى الرسغ ثم إلى الأصابع، ويمكن رؤية الخطوات بأكملها باستخدام بعض الصبغات (الشكل 3,2)، إنّ ترتيب الأحداث في نموّ الطرف وقطبية الأصابع تعني، تماماً كما شاهدنا على مستوى الجنين، وجوب وجود نظامٍ منهجيٍ يتحكم وينقل الخلايا إلى الصورة التي ستؤول إليها لاحقاً.



الشكل 3,2 تكوّن طرف الدجاجة. ينمو برعما جناح ورجل الدجاجة بسرعة خلال بضعة أيام في مرحلة نمو الجنين. اصطفاف الغضروف الذي يسبق ترسّب المعضّي يبدو واضحاً بصبغة خاصة حيث يتشكل شيئاً فشيئاً من أعلى الطرف حتى الأصابع، علماً بأن التفاصيل التشريحية للجناح والرجل مختلفة. (الصور تقدمة من جوزيف لانكمان (Joseph J. Lancman) وجون فالون (John Fallon)، قسم التشريح، جامعة وسكُنسن).

قبل عدة عقود اكتشف جون ساندرز (John Saunders)، وهو أحد روّاد علم الأجنة الآخرين، معضّي القطبية في برعم جناح الدجاجة، إذ لجناح الدجاجة عادة ثلاث أصابع يمكن تعريفها تبعاً لحجمها وشكلها كالتالي: الإصبع 2 والإصبع 3 والإصبع 4 (بالترتيب من مقدمة الجناح

باتجاه الخلف، في حين لا تتشكل الإصبعان 1 و5 في الجناح أصلاً). عندما نقل ساندرز قطعة نسيج من مؤخر (posterior) برعم الجناح النامي (من المنطقة التي ستخرج منها الإصبع 4) إلى مقدمة (anterior) البرعم (المنطقة التي ستخرج منها الإصبع 2) تشكل جناح بأصابع إضافية. وكانت الأصابع عبارة عن صورة مطابقة للنمط الطبيعي، فعوضاً عن ظهور التسلسل العادي 2 3 4 تشكل نمط جديد هو 4 3 2 3 4 (الشكل 4,2). توحي هذه القطبية المنعكسة بأنّ الخلايا في مؤخر البرعم تعضي استقطاب تسلسل الأصابع (4، 3، 2) بحيث إنها عندما تنقل إلى مكان آخر فإن التسلسل 4، 3، 2 يظهر في هذا المكان الجديد.



الشكل 4,2 **التحريض على كثرة الأصابع (polydactyly) في الدجاج.** نقل منطقة النشاط الاستقطابي الموجودة في برعم الجناح النامي من المؤخرة وزرعها في مقدمة الجناح يستحث نموّ أصابع إضافية بقطبية معاكسة لنمط الأصابع الطبيعي. (الصورتان تقدمة من جوزيف لانكمان وجون فالون، قسم التشريح، جامعة وسكُنسن).

إن مجال تأثير معضّي سبيمان ومنطقة النشاط الاستقطابي في طرف جنين الدجاجة كبير نوعاً ما؛ يشمل نمو الجنين بأكمله أو جزءاً كبيراً منه. لكن اتضح لاحقاً أن المعضّيات تعمل على مستويات أصغر، ففي عام 1980 وجد فرِد نيهوت (Fred Nijhout) من جامعة ديوك (Duke University) أن أنماط العُيينات في أجنحة الفراشة ينتجها معضٍ أيضاً، إذ عمد نيهوت إلى قتل رقعة صغيرة من الخلايا التي ستكوّن مركز العُيينة فلم يتشكل أي شيء. والمثير للاهتمام أنه عندما نقل مجموعة الخلايا هذه من جناح الفراشة النامية في أول يوم من مرحلة الخادرة (chrysalis stage) وزرعها في مكان آخر من الجناح، نمت فيه عُيينة جديدة (الشكل 5,2)، وهذه الخاصية توجد فقط في الخلايا التي ستكون مركز البقعة مستقبلاً، فأطلق نيهوت على معضّي العُيينة اسم «البؤرة».



الشكل 5,2 **التحريض على تكوّن العُيينات في فراشة.** نقل الخلايا من مركز يتشكل، أي شيء النامية وزرعها في أماكن أخرى في جناح الجنين يكّون عُيينة جديدة. (الصورة تقدمة من د. فريدريك نيهوت، من كتابه [نمو وتطور أنماط جناح الفراشة] ***The Development And Evolution of Butterfly Wing Patterns***، بإذن من مطبعة معهد سميثسونيان).

تتشارك جميع المعضّيات خاصيةَ التحكّم في تشكيل الأنماط أو التشكل (morphogenesis) سواءً في الأنسجة أو الخلايا، والتفسير الأساسي

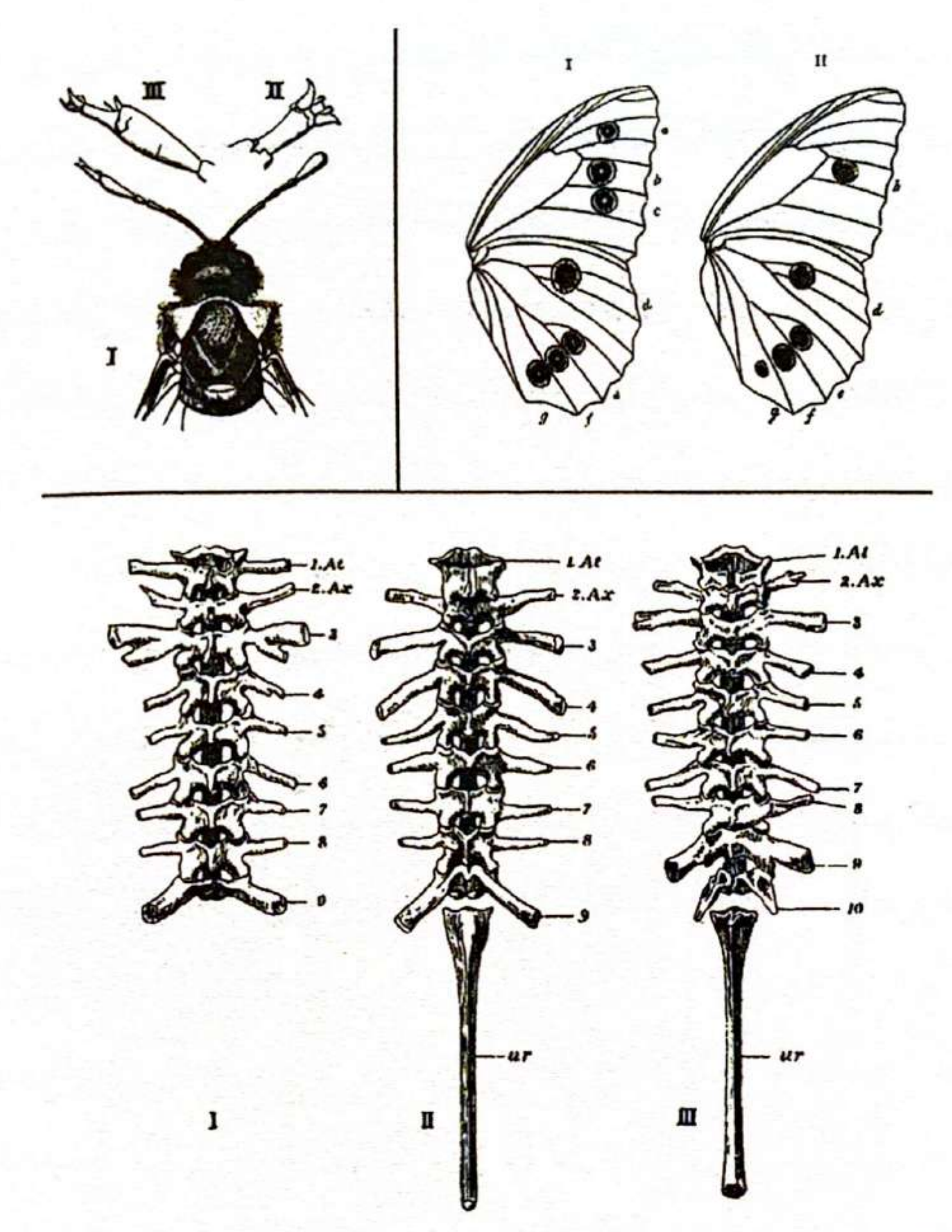
لهذه القدرة الخاصة هو أن خلايا هذه المعضّيات تنتج مواد قادرة على التحكم في نمو الخلايا الأخرى، وقد سمّيت هذه المواد بالمورفوجينات (morphogens). إنّ تأثير هذه المعضّيات يتوقّف على المسافة التي تفصلها عن الخلايا المستهدفة (الخلايا الأقرب هي الأكثر تأثراً بينما الخلايا الأبعد في جنين سمندل الماء أو برعم الطرف أو جناح الفراشة هي الأقل تأثراً أو لا تتأثّر). وقد عرف منذ فترة طويلة أن المورفوجينات المتولّدة في موقع معين تنتشر بعيداً مكوّنة مدروجات التركيز (concentration gradients) ابتداءً من مصدرها. وهذا يعني أن الخلايا حول المصدر تستجيب تبعاً لكمية المورفوجينات التي تتعرّض لها. على سبيل المثال، تنمو الخلايا القريبة من منطقة النشاط الاستقطابي (في برعم جناح الدجاجة) إلى أصابع خلفية (الإصبع 4)، في حين تنمو الخلايا البعيدة تدريجياً إلى أصابع أمامية (الأصابع 3 و2 و1 بالترتيب). أما في عُيينات الفراشة فيُعتقد أن الحلقات المتحدة المركز للحراشف المختلفة الألوان تعكس استجابات مختلفة للمورفوجينات تبعاً للمسافة بينها وبين المركز البؤري.

المورفوجينات المسؤولة عن أنشطة المعضّيات هي من «الكؤوس المقدّسة» التي يُسعى وراءها في علم الأجنة. الصعوبة الرئيسة التي عرقلت تقدّم هذا البحث هي أن نشاط المعضّي يعود لخاصية مجموعات من الخلايا. والخلية تنتج آلاف المواد، ومن المحتمل دائماً أن تكون أكثر من مادة مسؤولة عن نشاط المعضّي الواحد. ورغم أن الازدراع (النقل والزرع) أداة فعالة جداً إلا أن علماء الأجنة احتاجوا إلى طريقة أخرى لاكتشاف المورفوجينات في الحساء المعقد للكيمياء الحيوية للخلية. ودام انتظارهم عقوداً.

وحوشٌ واعدة

لقد كانت الحيوانات التي أنتجها سبيمان وساندرز ونيهوت وحوشاً (monsters) من صنع الإنسان، لها محاور أو أصابع إضافية أو بقع محوّرة على أجنحتها. غير أن هذه الشذوذات ليست غريبة على الطبيعة، فقد صنّف بيتسون ووصف في رسالته **[مواد لدراسة التفاوت]** *Material for the Study of Variation* الصادرة عام 1804، **عدداً هائلاً من** «الوحوش» في أرجاء المملكة الحيوانية تُبدي أجزاء إضافية أو محوّرة أو مفقودة. انتقى مادته هذه من المتاحف وهواة التجميع وأقسام التشريح عبر أوروبا وصنع منها حديقةً فخمة للغرائب. وفيها تستطيع رؤية ذبابة المنشار (sawfly) والنحلة الطنانة (bumblebee) وقد نمت لهما سيقان مكان قرون الاستشعار اليسرى، وجرادة بحر (crayfish) بقنوات بيض إضافية، وفراشات بعُيينات إضافية أو ناقصة، وضفادع بفقرات إضافية أو فقرات محّورة، وغيرها كثير (الشكل 2 ,6).

قسم بيتسون هذه الشذوذات إلى قسمين رئيسيين: الحيوانات التي تغيّر فيها العدد الطبيعي للأجزاء المتكرّرة والحيوانات التي حدث لجزء من جسمها تحوّل ليحاكي جزءاً آخر، وأطلق على النوع الثاني اسم «النحيتة» (homeotic) (مأخوذة من الأصل الإغريقي (homeos) والتي تعني المشابه)، وهذا من المصطلحات المهمة التي يجب تذكّرها. كان دافع بيتسون لجمع هذه الحيوانات الغريبة إظهار أن الوثبات المورفولوجية ممكنة في الطبيعة، وبالتالي فإنها توفّر الأسس للتغيرات والتفاوتات التطوّرية. ويجب أن أذكر مباشرة هنا أنه بالرغم من جاذبية وبداهة حدس بيتسون التي تظهر من الوهلة الأولى، إلا أن علماء الأحياء



الشكل 6,2 **بعض وحوش بيتسون**. فوق إلى اليسار، نحيتة ذبابة المنشار وقد تحوّل أحد قرون استشعارها إلى رجل، فوق إلى اليمين، عُيينات مفقودة من جناح فراشة، تحت، التفاوت في الفقرات ونتوءاتها في ضفدع. (من كتاب بيتسون، [مواد لدراسة التفاوت] (1894)).

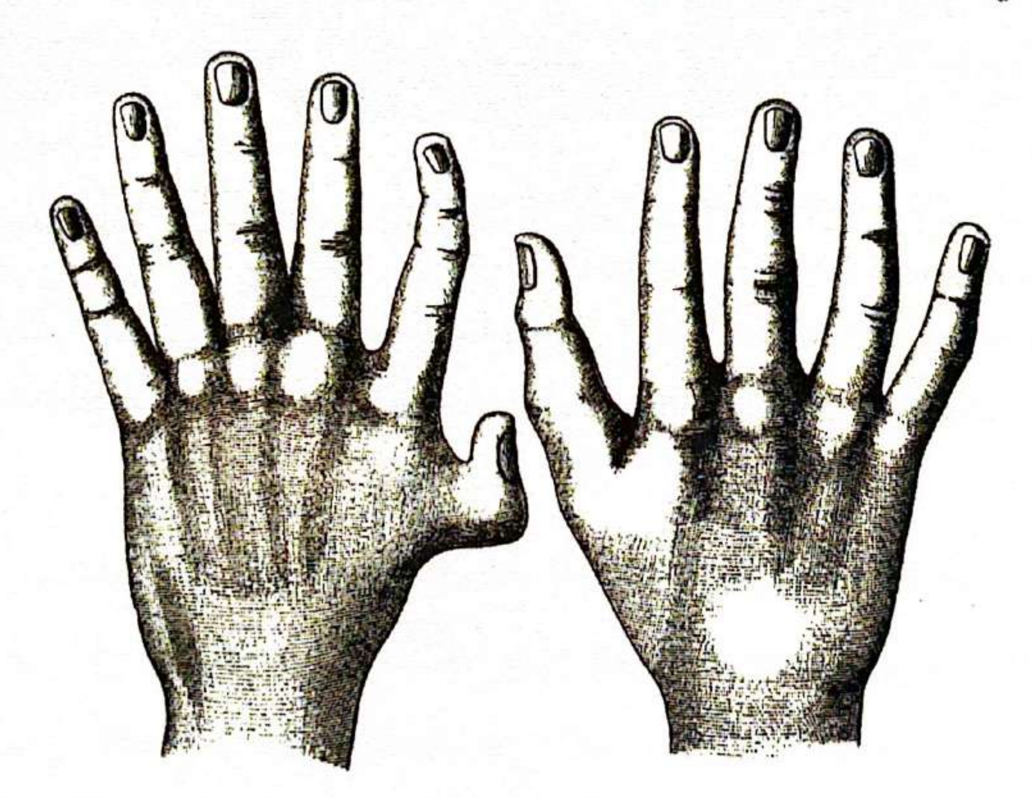
يعتقدون ولأسباب معقولة أن فكرة اتخاذ التطوّر قفزة كبيرة من هذا النوع بعيدة الاحتمال. فوجود مثل هذه التغيّرات لا يعني أنها تأسيس لنوع أو طراز جديد، بل وبناءً على ما نعرفه الآن فإن هذه الوحوش لا تلائم الحياة وسيتم إزاحتها بعيداً بقوة قانون الانتخاب الطبيعي،

دون منحها أي فرصة لتمرير سماتها عبر الأجيال. من الصعب تبديد هذه الفكرة عن «وحوشٍ واعدة» (hopeful monesters) تُنتج أشكالاً جديدة عبر قفزة واحدة وخاصة في وسائل الإعلام العلمية (حتى أن البي بي سي انتجت برنامجاً يحمل هذا العنوان قبل عدة سنوات، بالرغم من مناشدتي المنتج حول افتقار هذه الفكرة لأية مصداقية علمية). إنها فكرة تتمتع بالإغراء المطلوب لكن لا حظ لها من الواقع، وسنشهد في ثنايا هذا الكتاب انتفاء أي دعم علمي أو حتى حاجة لاستحضار هذه الوحوش الواعدة باعتبارها عوامل تطوّر.

لعل العائق الأبرز الذي يتكشّف مباشرة في مجموعات بيتسون هي أن أغلب الأمثلة تظهر بعيب في أحد البنى الزوجية من الجسم فقط مع بقاء الزوج الآخر سليماً، ورغم تحفيزها للذهن إلا أن هذه المعروضات العديمة الأقران نادرة الوجود وأسباب فرادتها وغرابتها غير معروفة. كان من الضروري معرفة هل تورّث مثل هذه الأشكال سماتها أو أنها مجرد نتيجةٍ لأذيّة تعرض لها الجنين في فترة التكوين (وبالتالي فهي لا تورّث للأجيال اللاحقة). غير أنه اتضح لاحقاً أن وحوش بيتسون مفيدة معرفياً، ليس لأنها تساعد كثيراً في الكشف عن السبب الحقيقي للتطوّر بل لتوفيرها الرؤية اللازمة لفهم النموّ الذي هو صنو التطوّر. وكما تنبأ الراحل ستيفن جاي جود في أحد مقالاته الأثيرة لديّ، والذي دفعني لتغيير مساري العلمي في البدايات، فإن وحوش بيتسون واعدة علمياً لكن ميؤوس منها كأفراد.

كم عدد الأصابع؟ تفاوت أصابع الإنسان من آن بولين وحتى رماة البيسبول

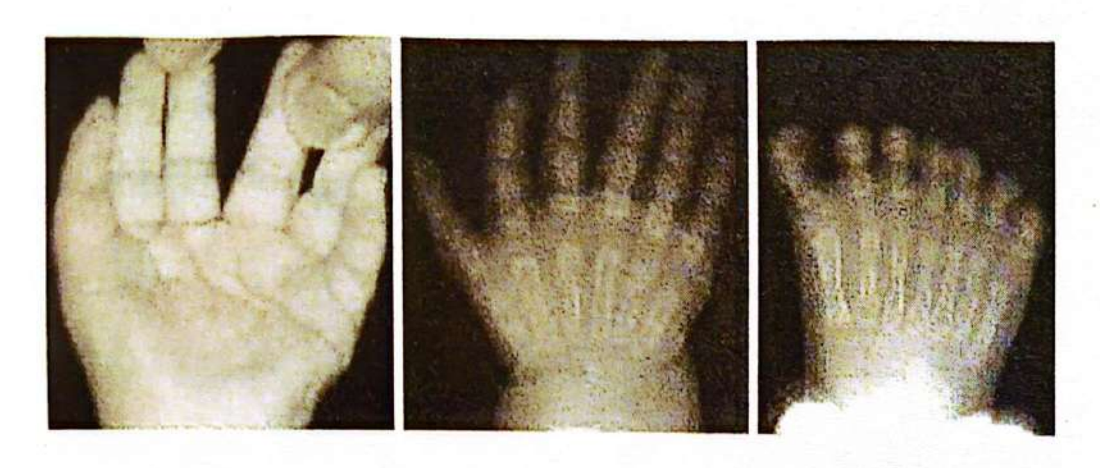
ضمّت مجموعة بيتسون للتفاوت أمثلة بشرية أيضاً، مثل إنسان بأضلاع إضافية، وآخر بحلمة أو زوجي حلمات إضافية، وحالة مذهلة لثمانية أصابع متناظرة مثل انعكاس المرآة في اليد اليسرى، وحالات لأفراد يمتلكون إصبعاً زائدة في إحدى أو كلتا اليدين (الشكل 7,2). وهذه الحالة الأخيرة تعرف باسم «العَنَش» (كثرة الأصابع polydactyly) وهي ليست نادرة بين البشر، إذ تظهر 5–17 مرة في كل 10,000 مولود.



الشكل 7,2 العنش (كثرة الأصابع) في يد إنسان. (من كتاب بيتسون، [مواد لدراسة التفاوت] (1894)).

توجد تدرّجات كثيرة في مقدار العنش، تبدأ من مجرد ظهور رفرف (flap) أو برعم صغير في حافة الخنصر أو الإبهام إلى ظهور أظفور إضافي

أو عظمة أو الإصبع بأكملها. وقد تكون الأصابع الإضافية منفصلة عن الأصابع الأخرى أو ملتحمة بها، وتعرف الحالة الأخيرة باسم «العنش الملتحم» (synpolydactyly). وفي بعض الحالات يظهر العنش في جميع جوانب اليدين والقدمين (الشكل 2 ,8).



الشكل 2,8 **العنش في اليدين والقدمين.** هذا المريض يمتلك ست أصابع في كل يد وسبع في كل قدم. (الصور تقدمة د. روبرت هل (Robert Hill)، وحدة الجينات البشرية بمجلس البحوث الطبية، أدنبرة، المملكة المتحدة، من دورية وقائع الأكاديمية الوطنية للعلوم (*Proceedings of The National Academy of Science*. USA 99 (2002): 7548)

يستطيع الإنسان العيش بنجاح بأصابع إضافية، وهناك حالات شهيرة في التاريخ، من بينها آن بولين (Anne Boleyn) زوجة الملك هنري الثامن (Henry VIII) التي كان لديها في الظاهر أظفوراً إضافياً في إحدى يديها، كما يُعتقد أيضاً أن ملك فرنسا شارل الثامن (Charles VIII) ونستون تشرشل كانا بأصابع إضافية، ولدى أنتونيو ألفونسكا (Antonio Alfonseca)، رامي الكرة الاحتياط في فريق فلوريدا مارلين الذي حقّق بطولة العالم في البيسبول عام 2003، ست أصابع في يديه وقدميه جميعاً، ولم يؤثر ذلك على قبضته الضاربة ولا على

نجاحه في الميدان، بل يبدو أنها وفّرت ميزة نفسية داعمة، فالخصم يعرف أنه يضرب الكرة باتجاه الرجل ذي الأصابع الست.

العَنَش عادةً ما يكون ظاهرة وراثية، وأنساب العوائل المصابة به موثقة ومعروفة. وقد أفيد عن أنه في منطقة تركية قريبة من إفسوس (Ephesus) تعرف باسم «ألتيبارماك» (*AltIparmak*) توجد عوائل تحمل نفس اسم المكان الذي يعني «الشخص ذا الأصابع الست».

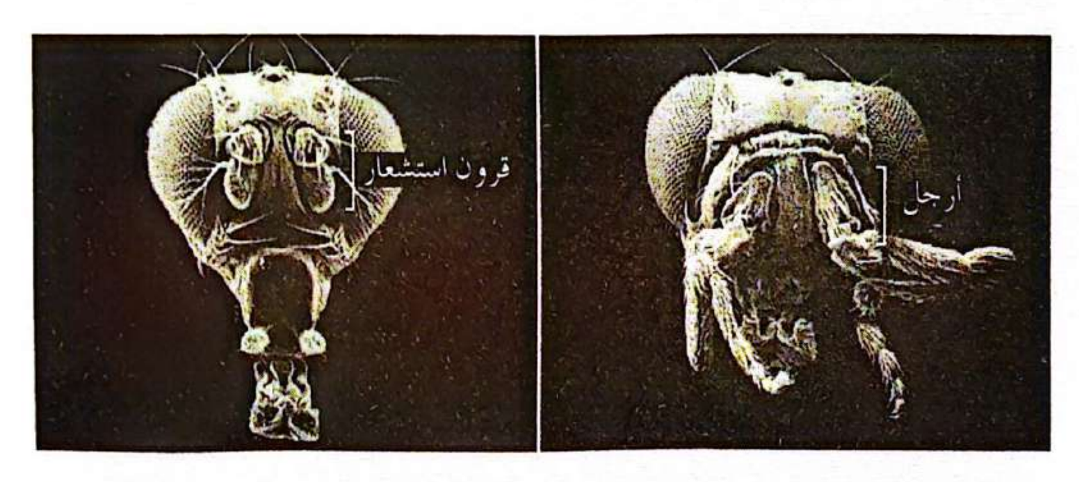
يظهر العَنَش بكثرة في الفقاريات، وبالأخص في القطط والفئران والدجاج. ومن الملفت أن تظهر أنماط أصابع متشابهة في حيوانات مختلفة بما في ذلك الإنسان، ويمكن توليد هذه الأنماط مختبرياً أو تكون مورَّثة. أوحى هذا بوجود آليات مشتركة بين الإنسان والدجاج توّلد أصابع إضافية، لكن لم يحدث أي تقدّم في فهم الآليات التي يقوم عليها عدد الأصابع أو أنماطها، إلاّ بعد إحراز تقدّم في دراسة بعض الطافرات المدهشة لدى حيوانات ليس لديها أي إصبعٍ، ذبابة الفاكهة المتواضعة.

فرانكنفلاي[1]

لإحراز مزيد من التقدّم في ما يمكن أن نتعلمه من الوحوش عن قوانين النموّ، كان لا بد من توفير مؤونة دائمة من الشذوذات الحية؛ وحوش تتناسل حقيقة في المختبر وتُظهر ذراريها وأجيالها اللاحقة الخصائص والسمات ذاتها. وقد تمكّن عالم جينات يدعى كالفن بريدجز (Calvin Bridges) عام 1915 من الحصول على أول نسل حقيقي من

(1) تحوير بلاغي لكلمة فرانكنشتاين رواية الكاتبة البريطانية ماري شيلي والتي يصنع فيها طالب ذكي من جامعة ركنسبورك مسخاً تدب فيه الحياة، المترجمان.

الطافرات النحيتة (homeotic mutants) لذبابة الفاكهة، وكانت تلك بداية بزوغ نجم حيوان رائد في البحوث الجينية. عزل بريدج طفرة تلقائية جعلت الجناحين الخلفيين الصغيرين مشابهين للجناحين الأماميين الكبيرين في ذبابة الفاكهة، وأطلق على الطافرة اسم «ثنائية الصدر» (*bithorax*). ثم أُنتجت بعد ذلك عدة طافرات مثلية في ذبابة الفاكهة من أبرزها طافرة «*أنتينابيديا*» (*Antennapedia*) حيث تنمو رجلان في الرأس مكان قرني الاستشعار (الشكل 9,2).

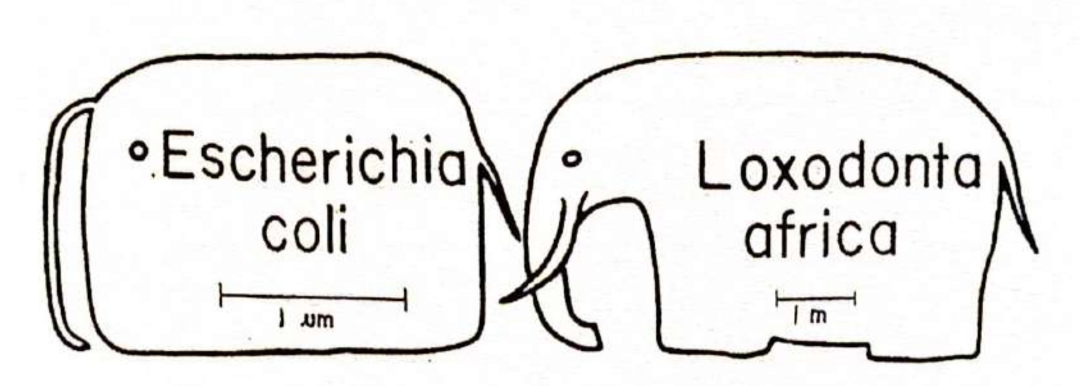


الشكل 9,2 **طافرة نحيتة لذبابة الفاكهة:** اليسار: رأس ذبابة طبيعي بقرني استشعار طبيعيين. اليمين: طافرة *أنتينابيديا* حيث تحول قرنا الاستشعار إلى رجلين. (الصورتان تقدمة د. رودي ترنر (Rudy Turner)، جامعة إنديانا).

إنه لمن الملفت حقاً أن تتمكّن هذه الطافرات النحيتة من تحويل بنية بأكملها إلى بنية أخرى مختلفة تماماً. لا تكمن المسألة في أن النموّ يتوقف أو يفشل، بل في فكرة أن مصير بنية بأكملها يتعرّض للتغيير، فينمو جزء ما في الموضع الخطأ من الجسم أو يتشكل العدد الخطأ من الأجزاء. الفكرة الأكثر جوهرية هنا هي أن هذا التحول يؤدي إلى استبدال عضو متنادد تسلسلياً بآخر (حيث يتحول قرن الاستشعار إلى رجل والجناح

الخلفي إلى جناح أمامي). والمثير للفضول أن كل تحوّل يعود إلى طفرة في جين *واحد* فقط. في ذبابة الفاكهة يوجد عدد بسيط من الجينات الناحتة (homeotic genes) التي تولد الأشكال النحيتة عندما تتعرّض للطفرة، وهذا يعني وجود عدد بسيط من الجينات «الحاكمة» (master genes) التي تتحكم في تمايز أعضاء الجسم المتنادة تسلسلياً في الذبابة.

ألهمت التأثيرات المذهلة للطافرات النحيتة ما سيصبح ثورة في علم الأجنّة، ثم ثورة أخرى في علم الأحياء التطوّرية. لكن حتى نفهم معنى هذه التأثيرات والرؤية التي تقدمها لنا، يجب أن نبحث بعمق في طبيعة الجينات الحاكمة في ذبابة الفاكهة. كيف يؤثر جين واحد في بنية بأكملها وليس في بنية أخرى؟ وما الذي تشفّره هذه الجينات ويمتلك هذا التأثير الهائل على جسم الحيوان؟ لعل ردة فعلك الأولى هي: ذبابة الفاكهة! لماذا يجب أن أعطي هذه الذبابة أي اهتمام؟ إن الإجابة عن جميع هذه الأسئلة ستتكشف بعد أن نفهم المزيد عن طبيعة «الدنا» وكيفية عمل الجينات، وفي الطريق سنصادف اكتشافات مفاجئة عن تراكيب جينومات الحيوانات المختلفة.



تمثيل طريف لعبارة مونو الشهيرة. (تقدمة د. سيمون سيلفر (Simon Silver)، جامعة إلينوي، شيكاغو)

الفصل 3

من الإي كولاي
إلى الفيلة

«ما ينطبق على *الإي كولاي* ينطبق أيضاً على الفيلة»

جاكوب مونو، الحائز جائزة نوبل

«نود اقتراح بنيةٍ لملح الحمض النووي المنقوص الأكسجين (الدنا)، هذه البنية تحوي سماتٍ فريدة تعود على علم الأحياء بالنفع الكبير». هكذا بدأ جيمس واتسون (James Watson) وفرانسيس كريك (Francis Crick) ورقتهما المقدمة عام 1953 التي أعلنت عن النموذج الجديد والصحيح للمادة الوراثية. إنّ الحمض النووي المنقوص

الأكسجين يعتبر خاصية عامة بتمثيله الأساس الوراثي لجميع ممالك الكائنات الحية الست: البكتيريا، والبكتيريا العتيقة (archeabacteria) والطلائعيات (protists) والفطريات (fungi) والنباتات، والحيوانات. وبعد ذلك بما يتعدّى العقد بقليل تمكّن العلماء من فهم خاصية عامة أخرى هي الشفرة الجينية (genetic code)، فهل كانت هناك سماتٌ شاملة أخرى بانتظار الاكتشاف؟

تختلف الخلايا والأنسجة والأعضاء (أينما وجدت) في أفراد كل مملكة حية اختلافاً بيّناً وبطرق مهمة، كما أن هناك تنوعاً هائلاً داخل المملكة الواحدة؛ فالحيوانات مثلاً تتفاوت بدءاً من العوالق (plankton) الضئيلة الحجم إلى الثدييات الضخمة في البر والبحر. لقد كانت أشكال هذه الكائنات الحية أساس تصنيفها العلمي الذي قسّمها إلى متشابه وغير متشابه، وتولّدت عن ذلك الفرضية القائمة منذ زمن طويل بأنه كلما زاد الاختلاف في الشكل قلّ التشابه، إن وجد أصلاً، بين أي نوعين على المستوى الجيني.

في نهاية هذا الفصل ستدرك تماماً أن مثل هذه الرؤية يمكن أن تكون خادعة. هذا الفصل مليء بالدهشات، إنه يتضمن حكاياتٍ عن عدة اكتشافات شكّلت وأعادت تشكيل تصوّراتنا عن الكيفية التي تطور بها الحيوان. إنه يكشف عن التيمة المتكرّرة والعميقة التي تربط بين الأشكال الحيوانية المختلفة. سأبدأ ببعض الأفكار المستوحاة من بكتيريا مجهرية بسيطة تكشف لنا أساسيات المنطق الجيني، ثم نتدرّج إلى وحوش أكثر تعقيداً وإلى الجينات الناحتة في ذبابة الفاكهة، ومنها نتفرّع إلى جميع كائنات المملكة الحيوانية.

البروتينات والدنا والمنطق الجيني

تمعن في خلايا أجسادنا المختلفة، ما وظائفها؟ وكيف تنفذ هذه الوظائف؟ خلايا الدم الحمراء تنقل الأكسجين إلى الأنسجة، والخلايا الموجودة في الجهاز الهضمي تعالج الطعام، والعصبونات (neurons) تنقل الدفقات الكهربية في نظامنا العصبي، والعضلات تحرك الأعضاء. هناك مستوى من التخصّص تمارسه هذه الخلايا، وذلك من خلال إنتاج نوع مخصوص من البروتينات، فالبروتينات هي الجزيئات التي تقوم بجميع الأعمال في الجسد. الخلايا الحمراء تنتج كميّات هائلة من بروتين الهيموجلوبين الحامل للأكسجين، والخلايا في البنكرياس تضخ التريبسين (trypsin) والبروتينات الأخرى التي تحوّل الأطعمة إلى مركّبات قابلة للاستخدام الخلوي، والعصبونات تصنع البروتينات التي توفر فرق الجهد الكهربي، وخلايا العضلات تصنع بروتينات تشكل أليافاً طويلة يؤدي انقباضها إلى توليد قوة الحركة. وبالرغم من أن هذه الخلايا مكرّسة لتنفيذ مهامّ محدّدة إلا أنها جميعاً تحوي المعلومات الوراثية (جزيئات الدنا) ذاتها، وبطريقة ما أصبحت هذه الخلايا مختلفة بإنتاجها أنواعاً معينة من البروتينات دون غيرها. إن اختيار إنتاج بروتينات معينة دون غيرها في أماكن معينة دون الأخرى وفي أوقات معينة دون سواها أمر مصيري في بناء المتعضّيات المعقّدة.

قبل أن يفهم علماء الأحياء كيف تتشكل الخلايا المختلفة في الحيوان، توجب عليهم أن يفهموا كيف تُخزّن المعلومات الوراثية وكيف تُنسخ وتفكّ شفرتها في متعضّيات بسيطة مثل بكتيريا الأمعاء المعروفة باسم *الإي كولاي (Escherichia coli)*. هناك عدة أنواع من هذه البكتيريا

بعضها مفيد، وبعضها الآخر في غاية الخطورة؛ لكن بالنسبة لعلماء الأحياء الجزيئية كانت *الإي كولاي* حليفاً مدهشاً ساعدنا في اكتشاف القواعد الأساسية للآليات والمنطق الذي تعمل به الجينات والبروتينات. لقد منحتنا دراسة هذه البكتيريا البسيطة الأساس الضروري للتفكير في نموّ وتطوّر الكائنات الأكثر تعقيداً.

إن اللغز الذي أوقد اهتمامات العلماء الأولى بالإي كولاي كان ظاهرة تحريض إنتاج الإنزيم (enzyme). فبكتيريا *الإي كولاي* تحب سكر الجلوكوز البسيط، لكنها تستطيع تفكيك أنواع السكّر الأخرى واستخدامها في حالة غياب الجلوكوز، مثل سكر اللاكتوز الذي يفكّك إلى جلوكوز وجالاكتوز بواسطة إنزيم يعرف باسم البيتا-جالاكتوسيداز (beta-galactosidase). عندما تنمو *الإي كولاي* في وسط جلوكوزي أو أي مصدر آخر للكربون، لا يمكن رصد سوى كمية ضئيلة جداً من إنزيم البيتا-جالاكتوسيداز، الذي يُنتج ببطء شديد لا يكاد يُلاحظ. إن *الإي كولاي* بطبيعة الحال لا تبدّد طاقتها في صناعة إنزيم لا تحتاج إليه أو لا يمكن استخدامه، لكن عند إضافة اللاكتوز إلى مستنبت البكتيريا وغياب الجلوكوز، يرتفع معدل إنتاج الإنزيم ألف مرة، ويصبح بالإمكان رصده خلال ثلاث دقائق فقط. بطريقة ما تستشعر البكتيريا وجود اللاكتوز وتحرّض على إنتاج الإنزيم المطلوب. كيف يمكن لهذه الخلية البسيطة أن «تعرف» أي إنزيم تحتاج إليه؟ وكيف يحرّض الإنزيم الصحيح بظهور المركّب نفسه الذي تفكّكه؟

قدم لنا الإجابة عن هذه الأسئلة العالمان فرانسوا جاكوب (François Jacob) وجاك مونو (Jacques Monod) الحاصلان على

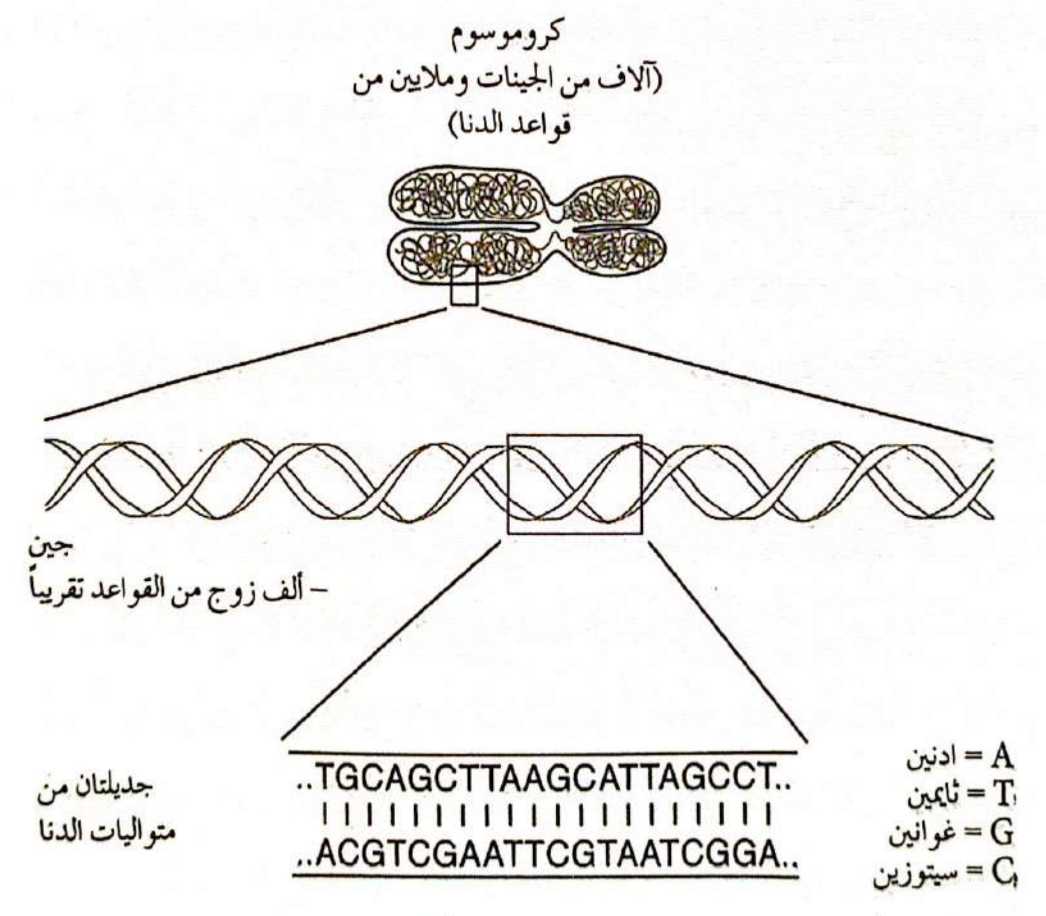
جائزة نوبل مشاطرة مع أندريه لواف (André Lwoff) في العام 1965. لم يكن أي من هؤلاء الثلاثة معزولاً في برج عاجي، فقد التقى جاكوب ومونو في معهد باستور (Pasteur Institute) بباريس بعد انتهاء الحرب العالمية الثانية التي كان مونو خلالها قيادياً في حركة المقاومة الفرنسية، وعمل لواف في جمع المعلومات الاستخبارية، وآوى بين الحين والآخر طياري المقاومة في شقته، وكان جاكوب طبيباً في قوات فرنسا الحرة في الحملة الأفريقية، وقد أصيب إصابة بالغة في إنزال النورماندي في أغسطس من العام 1944. إن الأحداث التاريخية التي سبقت أعمالهم والأهمية الجوهرية لهذه الأعمال والسمات الشخصية الاستثنائية لهؤلاء الروّاد الثلاثة جعلت قصة اكتشاف عملية تحريض إنتاج الإنزيم والمنطق الجيني في البكتيريا من أكثر القصص دراماتيكية في تاريخ علم الأحياء الحديث.

من أجل أن نفهم الكيفية التي يحرّض بها الإنزيم في البكتيريا وعلاقة ذلك بالمتعضّيات الأكثر تعقيداً يلزمنا أن نفهم مبدئياً تراكيب ووظائف الدنا والرنا والبروتينات. أدرك أنها قد تبدو غامضة وصعبة الفهم إلا أن المنطق الجيني لا يتكشف إلا إذا امتلكنا تصوّراً واضحاً لطريقة عمل هذه العناصر، وفهمنا أدوارها المختلفة والتفاعلات فيما بينها. والأهم من ذلك إن هناك بعض الاكتشافات الكبيرة التي سيكشف عنها قريباً والتي يتوقّف تأثيرها على فهمنا للجزيئات الكيميائية المختلفة التي تشكل الكائن الحي.

تتلخص العلاقة بين الدنا والرنا والبروتين على النحو التالي: الدنا (DNA) هو قالب مخصص لصناعة الرنا (RNA)، والرنا هو قالب

لصناعة البروتين، ولذلك فإن الشفرات الوراثية المخزّنة في الدنا تُفكّ على مرحلتين لإنتاج البروتين الذي يقوم بجميع الأعمال في الخلية والجسم.

دعونا نفرق في البداية بين الكروموسوم والجين والدنا (الشكل 1,3). الكروموسوم (chromosome) هو جزيء طويل جداً من الدنا، أما الجين فيشغل حيزاً محدداً من هذا الجزيء الطويل. يتكوّن الدنا من ضفيرتين من لبنات بناء تسمّى نكليوتيدات (nucleotides)، كل نكليوتيد يحوي واحدة من *القواعد* الأربع الأساسية والتي تسمى

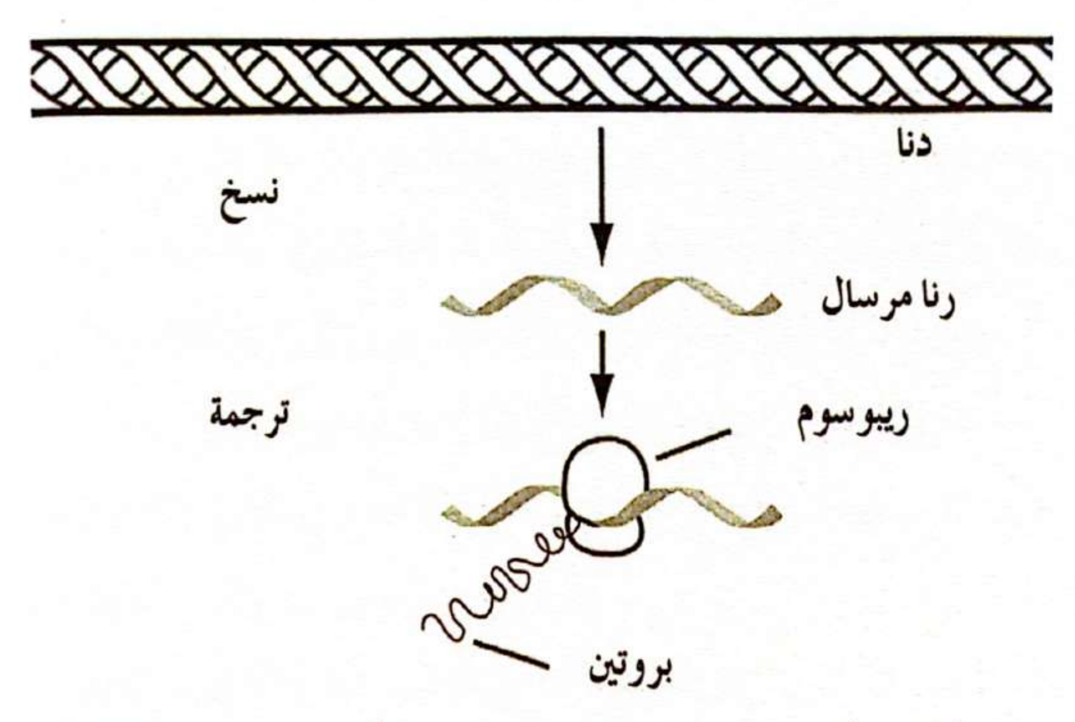


الشكل 1,3 **الكروموسومات والدنا والجينات.** الكروموسومات هي جزيئات ضخمة من الدنا تشفّر ألف جين أو أكثر، والدنا يتكّون من جديلتين من النكليوتيدات (.A. G C.T) تمسك بهما روابط بين القواعد في الجديلتين المتقابلتين، والجينات تُشفَر بقطع مختلفة الأطوال من متواليات الدنا، (رسم ليان أولدز (Leanne Olds)).

اختصاراً (A) و (C) و (G) و (T). تمسك بجديلتي الدنا روابط قوية بين أزواج القواعد الموجودة في الجديلتين المتقابلتين. يتفاوت عدد الكروموسومات بين الكائنات الحية فقد يكون واحداً كما هو الحال في بكتيريا *الإي كولاي* أو أكثر (أجسادنا مثلاً فيها ثلاثة وعشرون زوجاً من الكروموسومات). ويحدّد الترتيب الفريد للقواعد في متوالية الدنا (ACGTCGAATT، إلخ) المعلومات الفريدة المشفّرة داخل كل جين.

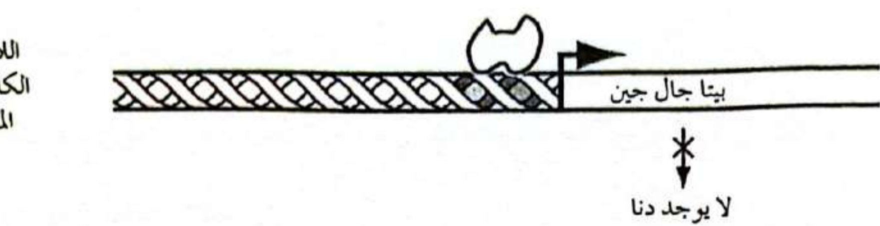
دعونا نرى الآن كيف يتم فك هذه الشفرة.

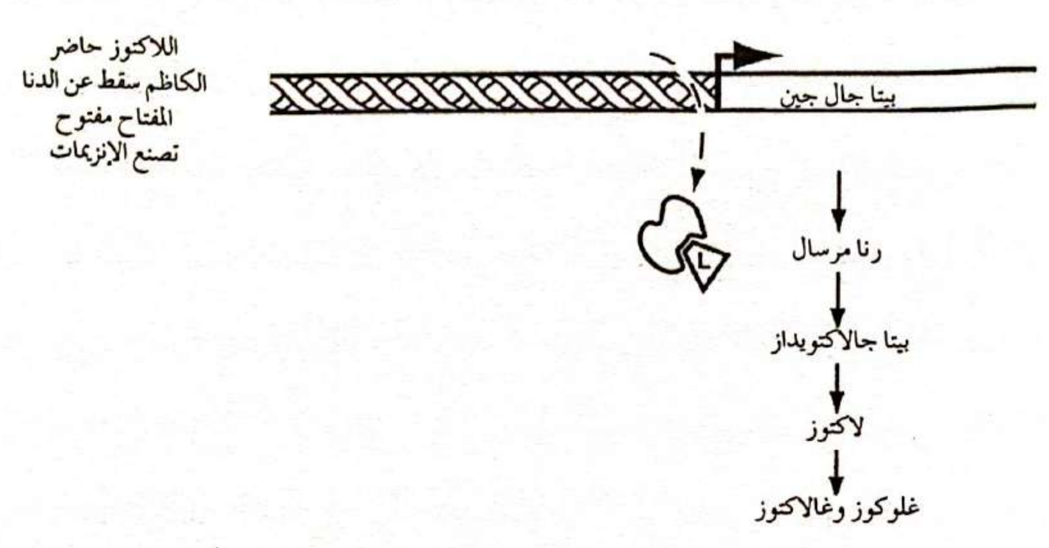
تعرف الخطوة الأولى في عملية فك التشفير *بالنسخ* (transcription)، وتشمل صنع نسخة أحادية الجديلة من «الرنا المرسال» (messenger RNA) من الجين، تكون متّممة لجديلة واحدة من جزيء الدنا. وفي الخطوة الثانية يُترجم الرنا المرسال إلى بروتين وتعرف هذه الخطوة *بالترجمة* (translation) (الشكل 2,3). وحتى تتم عملية الترجمة فإن ذلك يتطلب شفرة جينية عامة تسمح بتحويل متواليات الرنا إلى متواليات بروتين. يتركب البروتين من وحدات بنائية هي الأحماض الأمينية، ترتبط معاً في سلاسل طويلة جداً، وبين متواليات هذه الأحماض ومتواليات القواعد النكليوتيدية في الدنا توجد علاقة تناظر مباشرة. إن متوالية الأحماض الأمينية هي ما يحدد شكل البروتين وخواصه الكيميائية، وإذا ما كان سيحمل الأكسجين، أو يشكّل ألياف العضلات، أو يعمل على تحطيم اللاكتوز أو أي أعمال أخرى.



الشكل 2,3 **تُفك شفرة البيانات من الدنا عبر خطوتين.** الأولى نسخ جزيء الرنا المرسال والثانية ترجمة هذا الجزيء إلى بروتين (رسم جوش كليس).

لنرجع الآن إلى تحريض إنتاج الإنزيم في بكتيريا *الإي كولاي*. إن المهمة الدقيقة هي معرفة كيف تنتج هذه البكتيريا إنزيم البيتا-جالاكتوسيداز عند ظهور اللاكتوز فقط. ما اكتشفه جاكوب ومونو هو أن إنتاج هذا الإنزيم يخضع لمفتاح (switch) يقبع بالقرب من جين البيتا-جالاكتوسيداز، يكون المفتاح مغلقاً عند غياب اللاكتوز لكنه يفتح بمجرد حضوره. يحوي هذا المفتاح قطعتين رئيستين؛ بروتين يسمى الكاظم اللاكتوزي (lac repressor)، وقطعة من الدنا مجاورة لجين البيتا-جالاكتوسيداز يلتصق بها الكاظم. عندما يكون البروتين ملتصقاً بقطعة الدنا يكون الجين مكبوحاً (مكظوماً) (repressed) فلا يتم إنتاج الرنا أو البروتين، إلا أنه عند وجود اللاكتوز ينفصل الكاظم عن قطعة الدنا ويبدأ نسخ الرنا وإنتاج الإنزيم (الشكل 3,3).





الشكل 3,3 **مفتاح جيني يتحكم في إنتاج البيتا-جالاكتوسداز وتأيض اللاكتوز في *الإي كولاي*.** يلتصق الكاظم اللاكتوزي بالمفتاح ويمنع عملية النسخ وذلك عند غياب اللاكتوز، أما عند توافره فينفصل الكاظم عن المفتاح ويبدأ النسخ والترجمة ويتم إنتاج الإنزيم، (رسم جوش كليس).

يعتبر التحكّم في إنتاج إنزيم البيتا-جالاكتوسيداز بواسطة الكاظم اللاكتوزي المثال الكلاسيكي على المنطق الجيني حيث يستخدم الجين فقط عند الطلب. *فالإي كولاي* تحوي 4288 جيناً، إلا أن جزءاً منها فقط يستخدم في وقت محدّد. وفي الإنسان ما يزيد على 25 ألف جين، يستخدم منها جزء بسيط فقط بحسب نوع الخلية أو العضو. للمنطق الجيني في هذه البكتيريا خاصيتان سنراهما مراراً وتكراراً هما:

1-يتم التحكم بالجين (تشغيلاً أو إيقافاً) من خلال بروتين يلتصق بالدنا، يعرف هذا البروتين باسم البروتين لفيف الدنا (DNA binding protein).

2-يميّز «البروتين لفيف الدنا» متوالية دنا محدّدة بجوار الجين.

لا نستطيع أن نعطي تأثير اكتشاف المفتاح الجيني في البكتيريا حقه مهما حاولنا، لم تكن تلك آلية أنيقة للتحكم في فسيولوجيا الخلايا فقط، بل، وكما فهم ذلك جاكوب ومونو، كان كشفاً يحمل في طياته الإجابة عن لغز أكبر؛ وهو كيف يتم التحكّم في عملية تمايز الخلايا (cell differentiation) في المتعضّيات الأكثر تعقيداً مثل البشر. لقد فهما أن وظائف الدم والدماغ والعضلات والخلايا إنما تُحدّد من خلال إنتاج بروتينات معيّنة تقوم بمهام هذه الأنسجة، وكان تحريض الإنزيم في البكتيريا هو المقدمة للتفكير في وظائف الخلايا المتخصّصة الموجودة في الحيوانات والأعضاء. تجاوزت موهبة جاكوب ومونو علم الجينات وامتدت لتشمل البراعة الأدبية، فأوراقهما العلمية المقدمة في بداية الستينيات تقف شاهداً باعتبارها من أرفع أدبيات علم الأحياء على مرّ العصور. وقد تجلّت هذه الموهبة على صفحات كتب بأكملها تسرد نتائج وتطبيقات أبحاثهما العلمية، ويمتلك كتاب [الفرصة والضرورة] *Chance and Necessity* لمونو شهرة في الأوساط الأدبية والفلسفية بالقدر ذاته في دوائر علم الأحياء. بالمثل كتب جاكوب مجموعة من الكلاسيكيات تتضمن سيرة ذاتية مرموقة.

كان هذا الكشف محمّلاً بإمكانات لامحدودة، لدرجة أن مونو كتب

ملاحظته الذكية الشهيرة: «ما ينطبق على *الإي كولاي* ينطبق أيضاً على الفيلة»، وكانت تلك قفزة جريئة إن أخذنا بالاعتبار مستوى المعارف الأحيائية آنذاك.

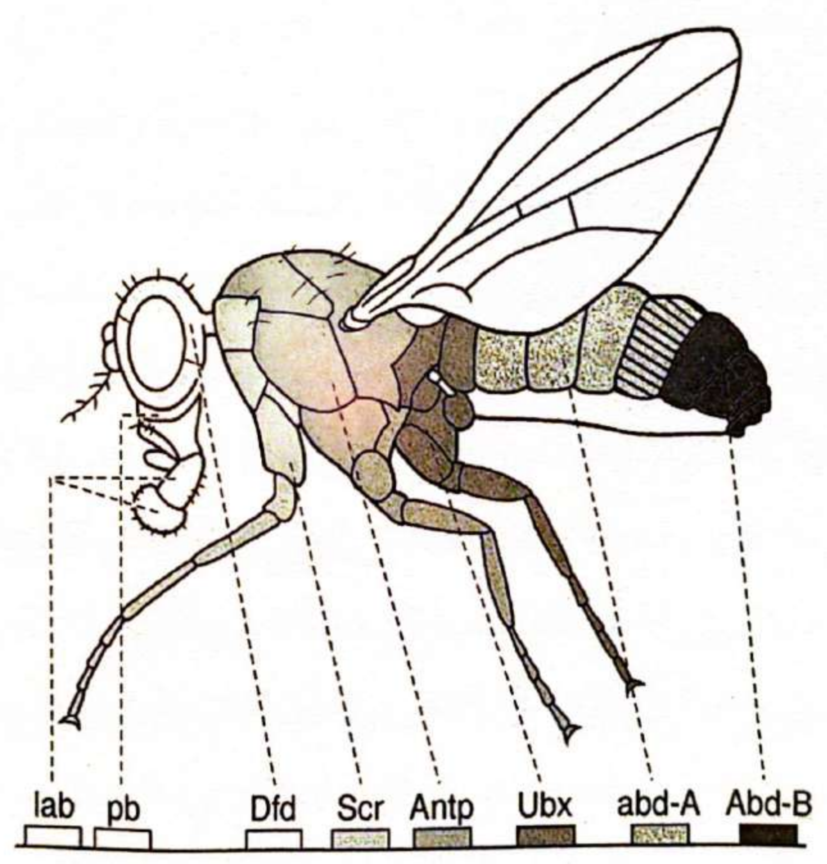
لقد كنا بعيدين جداً عن الفيلة في العام 1965، فهل كان مونو محقاً؟ هل يمكن تعميم هذا المنطق الجيني الموجود في البكتيريا ليشمل أكبر وأكثر الحيوانات تعقيداً على وجه البسيطة؟ لم يكن الفيل هو ما زوّدنا بالإجابة، بل حشرة صغيرة، هي ذبابة الفاكهة، وقد تدفّقت حينها سلسلة من الأفكار الثورية التي لا تخطر على بال، وكانت البداية مع تلك الوحوش النحيتة.

صندوق النحت

مثلت الطافرات النحيتة لذبابات الفاكهة إغراءً لعلماء الأحياء اليافعين. إذ ظهرت ذبابات الفاكهة والسيقان خارجة من رؤوسها أو بزوجي أجنحة إضافيين أو أقدام في منطقة الفم، وقد غذى جزء من جاذبية هذه الطافرات أفلام هوليود المنخفضة التكلفة، لكن الدافع الأكبر كان الفضول المعرفي الذي تثيره فكرة أن هذه الوحوش الملفتة للنظر وجدت بسبب طفرات في جينات مفردة تحوّل أجزاء كاملة من الجسم إلى أجزاء أخرى، كيف يمكن أن يؤدي تغيّر جين واحد إلى تغيّر دراماتيكي في الجسم؟ ما هي الوظيفة التي تقوم بها هذه الجينات الساحرة؟

توقّفت الإجابة عن هذه التساؤلات على تطوّر تقنيات استنساخ الجينات (gene cloning)، وبتقدم هذه الطرق وانتشارها جذبت الجينات الناحتة اهتمام عدد قليل من علماء الأحياء الشجعان، الذين

تسلحوا بعدة سنوات من البحوث العلمية السابقة التي حدّدت أن هذه الجينات تقع في الكروموسوم الثالث من أصل أربعة كروموسومات تشكل مجموع الشفرة الوراثية لذبابة الفاكهة. ومما يثير الاهتمام أن هذه الجينات تصطف في عنقودين متقاربين، أطلق على الأول اسم ثنائي الصدر (Bithorax) ويحوي ثلاثة جينات تؤثر في النصف الخلفي من جسم الذبابة، أما العنقود الثاني وهو الأنتينابيديا (Antennapedia) فيحوي خمسة جينات تؤثر في النصف الأمامي من الذبابة. والمثير حقاً أن ترتيب هذه الجينات في العنقودين يتناظر تماماً مع ترتيب أجزاء جسم ذبابة الفاكهة المتأثرة بهذه الجينات (الشكل 4,3). لقد بعثت هذه العلاقة



الشكل 4,3 **جينات Hox في ذبابة الفاكهة.** هي ثمانية جينات (اختصار اسم كل جين موضح في الرسم مثل *lab*) متموضعة في أحد كروموسومات ذبابة الفاكهة، وكل جين يؤثّر في نمو منطقة مختلفة على طول محور الجسم (تظهر كل منطقة بتظليل مختلف) (رسم ليان أولدز).

المثيرة والغامضة أملاً بأن خلف هذه المجموعات الجينية تكمن إشارات مهمة عن المنطق الشامل لبناء وتنميط الجسم.

بحلول العام 1983 نجح العلماء في عزل هذه الجينات وتحليلها. كان الهدف الأول هو معرفة نوع البروتينات المشفّرة في الجينات الناحتة الثمانية. أول اكتشاف رئيسي هو أن لكل من الألف قاعدة تقريباً، التي تشفّر كلاً من البروتينات الناحتة المختلفة، قطعة قصيرة من نحو 180 زوجاً من القواعد المتماثلة جداً في التتالي. وعند ترجمتها إلى بروتينات تُكوِّن نطاقاً[1] من 60 حمضاً أمينياً (جزء من كل بروتين). يعني ذلك أنه بالرغم من أن كل جين مثلي يمتلك تأثيراً محدداً في منطقة معينة من جسم الذبابة إلا أن البروتينات الناحتة تتشارك بعض الخواص الوظيفية. لعلماء الأحياء الجزيئية تقاليد معينة في تسمية الخواص المكتشفة في الدنا، ولأن هذه المتوالية المكوّنة من 180 زوجاً من القواعد في الجينات الناحتة تشكّل «صندوقاً» من الأشياء المتشابهة والمغايرة لبقية متوالية الدنا الطويلة، سميت متوالية الدنا المشتركة «صندوق النحت» (homeobox) وسمي نطاق البروتينات الذي تشفّره «النطاق النحتي» (homeodomain)، وأسميت الجينات الناحتة مع صناديق النحت لاحقاً «جينات النحت Hox» لكن ما الذي يقوم به النطاق النحتي؟ ما هي المهمة التي يضطلع بها؟ كان زميلي في المختبر آلن لون (Allen Laughon) يعمل على تحديد متوالية جين في مجمع الأنتينابيديا وأراد أن يعرف طبيعة عمله. ومن المعروف أن إحدى الاستراتيجيات التي يتبعها علماء الأحياء لدراسة

---

(1) (النطاق domain) جزء من البروتين يشكل وحدة بنائية متميزة وله فعالية معينة، ويكون النطاق متناددا (homologous domain) حينما يوجد في بروتينات مختلفة. بتصرف عن لوديش. المترجمان

ما لا يبدو واضحاً، هو النظر في الأنماط الموجودة في الجزيئات بحثاً عن تشابهات بين الجزيئات المكتشفة حديثاً والجزيئات المعروفة، وهكذا محّص آلن النطاق النحتي بحثاً عن أي تشابهات مع البروتينات المعروفة محاولاً التوصل إلى تشابه بنيوي يعطي تلميحاً عن وظيفة هذا النطاق.

في مكان ما رأى آلن بنية شبيهة بالنطاق النحتي...

الكاظم اللاكتوزي. ليس تشابهاً بالكاظم اللاكتوزي فقط بل بكاتلوجٍ كاملٍ من البروتينات لفيفة الدنا تلتصق بالمفاتيح الجينية في البكتيريا والخمائر.

بنجو.

عنت التشابهات أن النطاق النحتي كان نطاق لفيف دنا يتكور في بنية مشابهة تماماً للبروتينات الأخرى. والتفسير الواضح هو أن البروتينات الناحتة ربما تتحكم في المفاتيح الجينية في مراحل نموّ الجنين ولهذا فهي تؤثر على تكوين وهوية البنى بأكملها.

كان ذلك نبأً عظيماً، لكن المشكّكين سيقولون: عملٌ جيد لكنكم لم تفعلوا أي شيء يذكر، انتقلتم من بكتيريا إلى ذبابة! بماذا يفيدنا هذا في فهم الحيوانات الرفيعة التي تهمنا؟ أو أنفسنا؟

إنني معتاد على هذا الاعتراض، فعندما بدأت دراسة ذبابة الفاكهة بعد حصولي على الدكتوراه مباشرة، جاد عليّ أحد قدامى العلماء بنصيحة: ذبابة الفاكهة؟! عُد إلى العالم الواقعي يا ولدي! أي شيء سنجنيه منها في ما يخص الإنسان وسائر الثدييات؟ لقد كان الاعتقاد السائد، الذي ترسّخ بفضل علم الحيوان (zoology) والانقسام الثقافي الواسع بين العلماء المشتغلين على الفئران أو الجرذان أو غيرها من النماذج التقليدية لعلم

الأحياء البشري، والعلماء المشتغلين على «الأشكال الدنيا» للحياة، هو أن قوانين الفسيولوجيا والنموّ في الثدييات مختلفة جداً عن تلك الموجودة في الحشرات والديدان. لقد كانت الاختلافات من الضخامة بحيث آمنوا أن شيئاً مثل ذبابة الفاكهة لن يخدمنا البتة في بحثنا عن الإنسان.

وكانت هناك مفاجآت ضخمة بانتظارهم.

توحيد المملكة

لم يكن بِل مكجنيز (Bill McGinnis) ومايك ليفين (Mike Levine) متلبسين بتلك الحالة الثقافية العلمية التي تعطي مكانة علوية للحيوانات المكسوة بالفراء، بل كانا واقعين تحت إغواء الطافرات النحتية في مختبر البروفسور والتر جيرنج (Walter Gehring) في جامعة بازل السويسرية حيث كانا يعملان. وبمجرد أن عرفا أن لكل من الجينات النحتية لذبابة الفاكهة صندوقاً مثلياً، شرعا في ما كان من وجهة نظرهما الخطوة المنطقية التالية. استخلاص كل دنا استطاعا الحصول عليه من مختلف الحيوانات أو تلك التي تسولاها من المختبرات الأخرى. شملت تلك المهمة أنواع الحشرات المختلفة وديدان التربة والضفادع والبقر وحتى البشر بحثاً عن صناديق النحت.

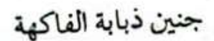
لقد راهنا على الجواد الفائز، وعثرا على كثير من صناديق النحت في هذه الحيوانات.

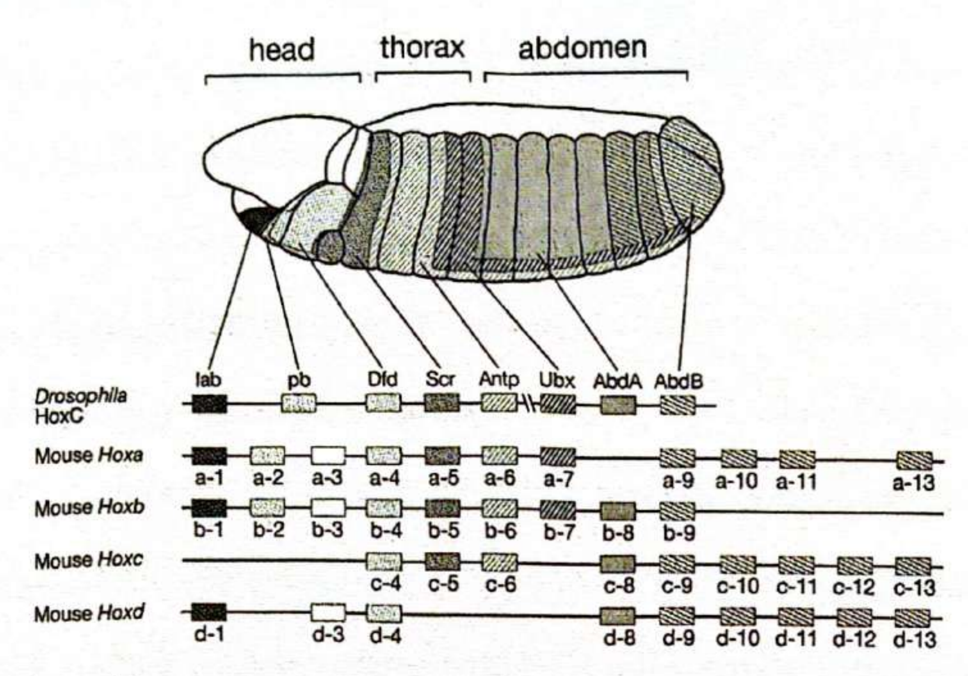
بعد أن دُرست متواليات هذه الصناديق دراسة تفصيلية ظهر التشابه بين الأنواع الحية صاعقاً، فمن بين الـ 60 حمضاً أمينياً في النطاق النحتي ظهر أن بعض بروتينات الفأر والضفدع كانت متطابقة مع ذبابة الفاكهة

في 59 موضعاً من أصل 60. هذا التشابه مدهش إلى أقصى الحدود، فقد انفصل الفأر عن الذبابة في الخط التطوري منذ أكثر من 500 مليون سنة قبل الانفجار الكامبري الشهير الذي ولّد أغلب أنواع الحيوانات. لم تكن لدى أي عالم أحياء أدنى فكرة عن أن مثل هذه التشابهات بين هذه الحيوانات المختلفة ممكنة على مستوى الجينات. لقد كانت جينات صناديق النحت من الأهمية بحيث حُفظت متوالياتها عبر المدة الزمنية السحيقةِ القِدم لتطوّر الحيوان.

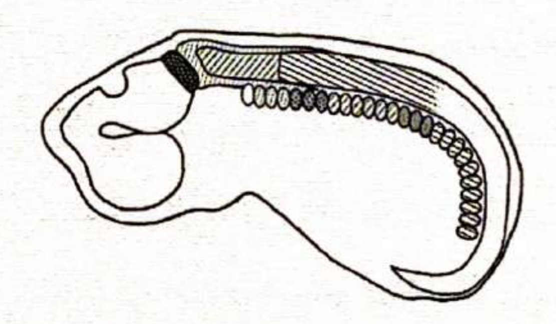
ظهرت في البداية تفسيرات مختلفة لصندوق النحت، إذ شكّك البعض في أهميته مفترضاً أنه ربما يشفّر وظيفة هامشية، مثل تحديد وجهة هذه البروتينات في الخلية. لكن سرعان ما اتضح أن صناديق النحت تقدّم أفكاراً عميقة. وقد شبّه جونثان سلاك (Jonathan Slack) من جامعة أكسفورد شبه اكتشاف صندوق النحت باكتشاف حجر رشيد في مصر الذي مكّن من فكّ رموز الهيروغليفية، فهل كان صندوق النحت المفتاح لفهم نمو الأجنة في جميع الحيوانات؟

بعد بضع سنين من اكتشاف جينات Hox في الفقاريات وغيرها من الحيوانات الأخرى، جاءت مفاجأة ربما هي الأكبر بينها جميعاً. فعندما حُدّد ترتيب جينات Hox في الفئران كانت في عناقيد (clusters) مثل ذبابة الفاكهة. والأكثر إدهاشاً أن ترتيب الجينات في كل عنقود يتناظر أيضاً مع ترتيب أعضاء الفأر حيث تنشط هذه الجينات. عنى هذا أن التشابه بين الحيوانات المختلفة يمتدّ عميقاً لا ليشمل التشابه بين متواليات الجينات فقط بل أيضاً في انتظامها في عناقيد، والكيفية التي تستخدم بها في الأجنة (الشكل 3,5).





جنين الفأر



الشكل 5,3 **تُنمّط عناقيد جينات Hox مناطق مختلفة في أنواع مختلفة من الأجنة. فوق:** الجينات في عنقود واحد من جينات صندوق النحت تؤثر في مناطق مختلفة من جنين الذبابة، تحت: جينات Hox في أربعة عناقيد تؤثر في مناطق مختلفة من جنين الفأر (رسم ليان أولدز).

لقد كانت الحقيقة جلية تماماً ولا يمكن التهرّب منها، فعناقيد جينات صندوق النحت تحدّد شكل نموّ الجنين في حيوانات مختلفة مثل الذباب والفئران، وندرك الآن أن ذلك يشمل جميع كائنات المملكة الحيوانية بما في ذلك البشر والفيلة. لم يتوقّع حتى أكثر المنافحين عن أبحاث ذبابة الفاكهة أن يكون لجينات Hox هذه الأهمية والانتشار العام المشترك.

كانت النتائج مذهلة، فالحيوانات المتباينة لا تبنى فقط بأدوات من ذات النوع، بل بالأدوات (الجينات) ذاتها. إن قافلة المفاجآت لا تتوقف عند جينات Hox... هنالك المزيد.

دروس تواضع إضافية من ذبابة الفاكهة:
عُدة أدوات من جينات بناء الجسم

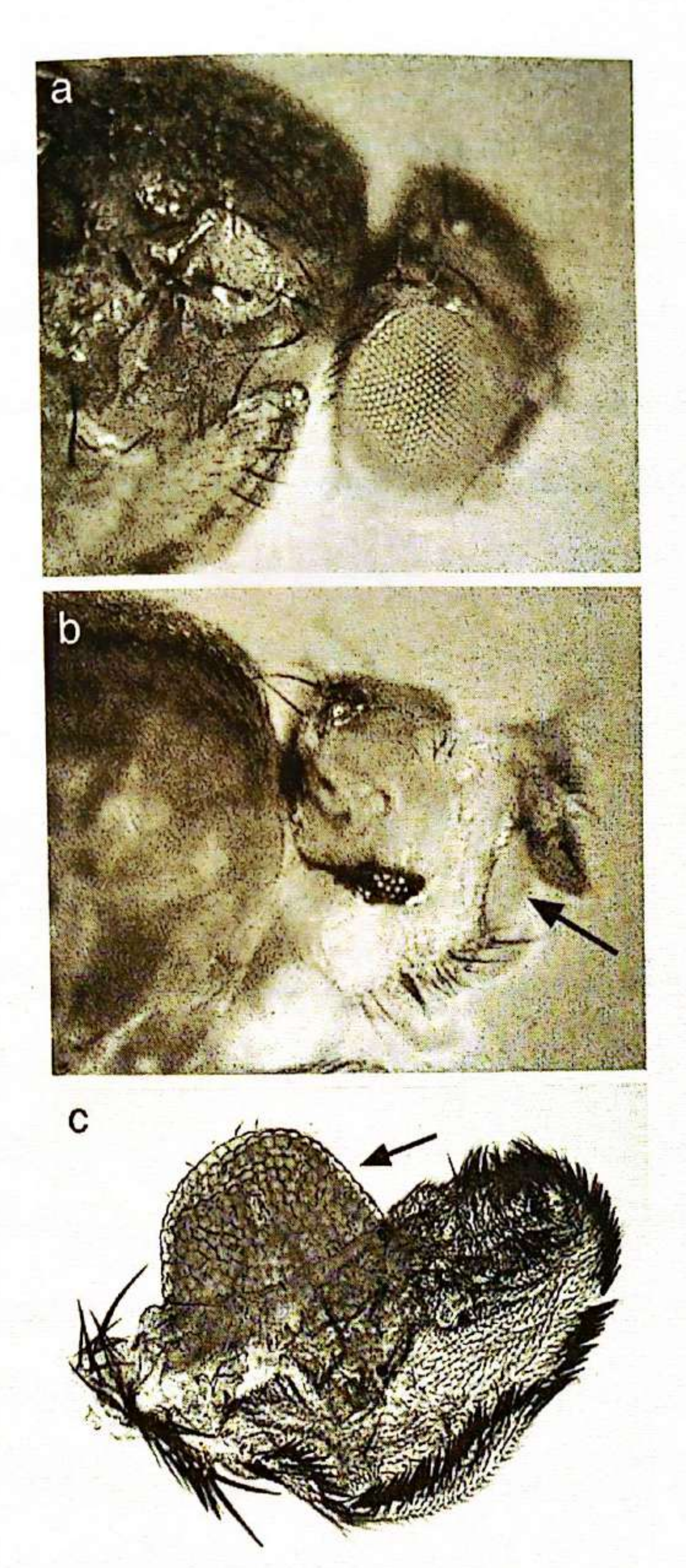
لا يبدو أن هناك أي شيء مشترك بيننا وبين ذبابة الفاكهة، فلا نمتلك قرون استشعار ولا أجنحة، ولا حتى عيوننا تشبه تلك العيون الحشرية المكونة من 800 وُجيه صغير تحدّق انطلاقاً من مركز ثابت. دمنا يُضخ بواسطة قلب مكون من حُجيرات أربع في جهاز دوران مغلق من الشرايين والأوردة، وليس مثل الذبابة التي تتلاطم أمواج دمها حرة في تجاويف الجسم. وفيما نمشي على قائمتين طويلتين مدعّمتين داخلياً بعظام صلبة، تمشي هي على ست قوائم صغيرة. مع هذه الاختلافات التشريحية الضخمة، لن يظن أحد أن في الذبابة ما يفيد بحثنا في كيفية تشكل أجسادنا وأعضائنا الداخلية. لقد ساد اعتقاد أيضاً أن بنى كالعينين قد تطوّرت من الصفر أربعين مرة في تطوّر الحيوان للتوصّل إلى مجموعة من التصاميم التشريحية والخواص البصرية.

في ضوء ذلك لن تجذب دراسة الجينات المسؤولة عن بناء العين في ذبابة الفاكهة الكثير من الاهتمام، لكن عندما عزل باحثون بمختبر والتر جيرنج جين *عديم العين* (*Eyeless*، سمي كذلك لأن الذبابة تفقد عينيها بسبب الجين الطافر) اكتشفوا أن هذا الجين موجود في الإنسان ويعرف باسم جين انعدام القزحية (*Aniridia*)، (سمي بذلك لأنه المسؤول عن

طفرة تؤدي إلى تقليص حجم قزحية العين أو اختفائها في الحالات الشديدة). وهذا الجين هو نفسه الجين المعروف في الفئران باسم *العين الصغيرة* (*Small eye*) الذي يؤدي تطفّره إلى تقليص أو اختفاء العين. كان هذا الاكتشاف محفزاً ومثيراً لأن عيوننا ذات العدسة الواحدة وعين الذبابة المتعددة العدسات مختلفة جداً على مستوى البنية وقد تكيّفت مع احتياجات مختلفة. لماذا إذاً يدخل الجين نفسه في تشكيل مثل هذه الأنواع المختلفة من العيون؟ هل هي إشارة لشيء أعمق يا ترى؟

هناك تجربتان إضافيتان عزّزتا أهمية الموضوع. فعندما عمد الباحثون إلى تشغيل جين *عديم العين* في مواضع أخرى من جسم الذبابة لوحظ تشكل نسيج العين في هذه المواضع، وصار بالإمكان مشاهدته في الأجنحة والسيقان وبقية أعضاء الجسم (الشكل 6,3). أظهرت هذه التجربة، بالإضافة إلى ما ذكرناه من تأثير تطفّر هذا الجين على حجم العين أو وجودها، أن جين *عديم العين* جين أساسي في نموّ العين، من دونه يفشل تشكّل العين، وحيثما ينشط يكوّن النسيج بنى العين. التجربة الثانية كانت عبارة عن نقل جين *العين الصغيرة* من الفأر إلى الذبابة بحيث يتم تشغيله في مواضع مختلفة من جسمها. ما الذي حدث برأيك؟

كانت النتيجة هي ذاتها التي ظهرت في التجربة الأولى لكن من المهمّ التأكيد على أن الأنسجة المتشكّلة لم تكن بنى عين فأر بل عين ذبابة. ذلك يعني أنه بالرغم من أن الجينين متشابهان ويؤثران تأثيراً متشابهاً إلا أن الشكل الأخير للعضو يتوقّف على السياق الذي يوجد فيه الجين (نوع الحيوان) وليس على أصل هذا الجين أو مصدره، إذ أن جين الفأر حرّض برنامج الذبابة لتشكيل عين ذبابة.



الشكل 6,3 **يتحكم جين حاكم بتكوين العين.** فوق: رأس ذبابة سويّ بعين متعدّدة العدسات. الوسط: ذبابة طافرة عديمة العين تفتقر إلى نسيج العين. تحت: تحريض نسيج العين في جناح ذبابة بعد تشغيل الجين في الجناح (الصور تقدمة من د. جورج هالدر، مركز أندرسون لأمراض السرطان، هيوستن).

تم اختصار أسماء جينات عديم *العين* وانعدام القزحية و*العين الصغيرة* تحت اسم قصير هو *باكس* 6 (*Pax-6*). لا يهمنا أصل هذه التسمية كثيراً بل المهم حقاً هو انتشار هذا الجين وارتباطه بتكوّن العين في مملكة الحيوان. لقد وُجد أن هذا الجين يرتبط بتشكّل العين في جميع الحيوانات ذات الأعين أياً كان نوعها، من العيون البسيطة كالتي في الديدان المسطحة، أو تلك الأكثر تعقيداً مثل الفقاريات. نحن أمام احتمالين نفسّر بهما هذا الانتشار الواسع لجين *باكس* 6 المؤثر في نمو العين في المملكة الحيوانية. يمكن أن تكون تلك مصادفة مذهلة أدت إلى ظهور هذا الجين لبناء العينين من الصفر في هذه الحيوانات المختلفة. أو أن هذا يعكس دوراً قديماً لجين *باكس* 6 في نموّ نوع من أنواع العيون عند سلف مشترك تفرّعت عنه جميع هذه الحيوانات، وتم الاحتفاظ بهذا الدور خلال عملية تطوّر الحيوان الطويلة. قبل ترجيح أحد هذين الاحتمالين، سأكشف عن تشابهات أخرى مفاجئة في عملية نموّ الحيوان.

تركّز اهتمامنا في مختبري على البحث في أصل وتطوّر الزوائد الخارجة من الجسم مثل السيقان والأجنحة والزعانف لأنها تمثل آلية رئيسية من آليات التكيّف عند الحيوان. لقد درسنا قبل عدة سنوات جين *انعدام الأطراف القاصية* (*distal-less* أو *Dll* اختصاراً)؛ سمي بذلك لأنه عندما يتطفّر فإن الأطراف القاصية[1] من جسم الذبابة تُفقد. وكنا نشعر بالفضول إذا ما كان الجين الباني للأطراف يلعب أي دور في الأنواع الأخرى، وكانت فرحتنا عارمة عندما وجدنا أن جين *Dll* منتشر في

(1) الأجزاء القاصية من جسم الذبابة هي قرون الاستشعار، وأجزاء الفم، والأرجل، والأجنحة. المترجمان

الأجزاء القاصية من أطراف الفراشة النامية، وفي أطراف القشريات والعناكب ومئويات الأرجل (centipedes) أيضاً. هذا يعني أن جين *Dll* يلعب دوراً في تكوين أطراف مفصليات الأرجل عموماً (دفع ذلك الكاتب الساخر ديف باري (Dave Barry) لاستخدام ورقتنا البحثية بمثابة أساس علمي لتبرير امتناعه عن تناول سرطان البحر لأنه مجرد حشرة ضخمة؛ لم تكن تلك حجة صحيحة من وجهة نظر التطّور لكننا بكل تأكيد نقدر هذا الاهتمام بالورقة). وحيث إن جميع هذه الحيوانات تنتمي للشعبة نفسها وتتشابه في تصاميم أطرافها، فقد بدا دخول جين *Dll* في عمليات بنائها جميعاً أمراً معقولاً. لكن ما لم نتوقّعه هو ما اكتشفناه عندما تفحّصنا نحن والمتعاونون معنا زوائد حيوانات لا ترتبط ارتباطاً وثيقاً بمفصليات الأرجل.

لقد وجدنا أن تكوين كل تلك الأجزاء الخارجة من أجسام الحيوانات بمختلف أنواعها مرتبط باستخدام جين *Dll*. يشمل ذلك سيقان الدجاج وزعانف الأسماك والزوائد في الديدان البحرية (Parapodia) والأمبولات والسيفونات على زقّاقات البحر (sea squirts)، والأقدام الأنبوبية عند قنافذ البحر. هذا الجين إذاً مثال آخر، مثل *باكس 6*، على أداة من عُدة الأدوات الجينية تدخل في صناعة بنى مختلفة جداً قاسمها المشترك هو ظهورها كأجزاء ممتدة خارج الجسم. تعود هذه الأجسام لحيوانات تقع على فروع رئيسية مختلفة في شجرة المملكة الحيوانية. ولهذا فإن التفسيرين المحتملين لوجود *باكس 6* في عملية تطوّر العين يصلحان أيضاً لتفسير وجود جين *Dll* في تطور الزوائد والأطراف؛ إما أن هذا الجين ظهر مصادفة أكثر من مرة لإقامة هذه الأبنية الحية من الصفر أو أن

هناك سلفاً مشتركاً استخدم هذا الجين لبناء زوائد معينة وتم الاحتفاظ بهذا الدور خلال رحلة تطوّر الحيوان.

ظهرت تشابهات أكثر بمرور الوقت بين الذبابة والفقاريات على المستويين الجيني والبنيوي. سأذكر هنا مثالاً آخر. على طول الجانب العلوي من الذبابة يوجد قلب ينقبض لضخّ السائل في تجويف الجسم، إذ إن للذباب نظاماً دورياً مفتوحاً، بمعنى أن الدم يعبر الأغشية حراً دون تجزؤٍ أو انقسام في حجيرات أو أوعية، ورغم أن قلوب هذه الذباب ليست قلوباً حقيقية بالمعايير البشرية لكنها تقوم بالمهمة المطلوبة على أكمل وجه. اكتشف علماء الجينات الجين الضروري لصناعة قلب الذبابة وأسموه *رجل الصفيح* (*tinman*) نسبة إلى شخصية من شخصيات رواية «ساحر أوز» *The Wizard of Oz* كان يفتقر إلى قلب.

حلّت المفاجأة عندما اكتُشِفت نسخ أخرى من *رجل الصفيح* عند العديد من الثدييات. وجمعت هذه الجينات تحت اسم عائلة (NK2)، وهو بالمناسبة اسم لا يتمتع بالجاذبية السحرية التي يحملها اسم *رجل الصفيح*، لكن الجاذبية الحقيقية تكمن في الدور المهم الذي يلعبه في تكوين القلب في جميع الثدييات بما في ذلك الإنسان. بالرغم من الفروقات الكبيرة في الأجهزة الدورانية والبنية التشريحية للقلب بين الذباب والفقاريات إلا أن هناك نوعاً واحداً من الجينات مكرساً لتكوين وتشكيل قلوبها جميعاً.

أخيراً هناك حقيقة مهمة جداً أرغب في إضافتها حول عوائل بروتينات باكس 6 وDll ورجل الصفيح في الذباب والفقاريات وسائر الحيوانات، وهي أن جميع هذه البروتينات بها نطاق نحتي، وهذا يعني أنها بروتينات

لفيفة دنا. إن هذه النطاقات النحتية شبيهة بالنطاقات النحتية لبروتينات جينات Hox لكنها غير مطابقة لها، بل إننا نعرف الآن بوجود ما يقارب دزينتين من عوائل النطاقات النحتية. تنتمي بروتينات Hox وباكس 6 و*Dll* ورجل الصفيح إلى أربع عوائل متغايرة، فبروتينات باكس 6 في مختلف الحيوانات أكثر شبهاً بعضها ببعض من شبهها بعوائل بروتينات النطاقات النحتية الأخرى. وبروتينات Hox و*Dll* ورجل الصفيح أكثر شبهاً بأعضاء عائلتها من شبهها ببروتينات النطاقات النحتية الأخرى. يعكس هذا الاختلاف بين أنواع النطاقات الجينية اختلافاً على مستوى الوظيفة التخصصية وهي الارتباط بمتواليات تحكّم متغايرة في الدنا. ولأن كل واحد منها يرتبط بالدنا ويؤثّر تأثيراً كبيراً على نمو الأعضاء أو الزوائد، فإننا نستنتج أن هذه البروتينات تنظّم حالة تشغيل/ إيقاف جينات أخرى في أثناء نمو العين أو الأطراف أو القلب. إن تأثيرها الكبير في عملية النموّ يعود إلى دورها في تنظيم عمل عدد كبير من الجينات أو بسبب تدخّلها المبكر في عملية بناء العضو أو للسببين معاً (وفي كلتا الحالتين يؤدي اختفاء أحد هذه الجينات إلى انهيار بناء ذلك العضو أو الجزء من الجسم).

إعادة النظر في تطوّر الحيوان

أدى اكتشاف أن مجموعة الجينات ذاتها تتحكم في تشكيل وتنميط أجزاء متشابهة وظيفياً (لكن متغايرة التصاميم) في الحشرات والفقاريات وسائر الحيوانات إلى إعادة النظر بالكامل في تاريخ الحيوان وأصول البنى المختلفة وطبيعة هذا التنوّع في الكائنات الحية. لقد افترض علماء

الأحياء التطوّرية والمقارنة لوقت طويل أن المجموعات المختلفة من الحيوانات التي تفصلها مسافات شاسعة في التاريخ التطوّري بُنيت أجسامها وتطوّرت بطرائق وأدوات مختلفة. وكانت العلاقة بين أعضاء بعض الجماعات كالعلاقة بين الفقاريات، أو حتى بين بعض الفقاريات والحيوانات الأخرى ذات الحبل الظهري، راسخة جداً. لكن العلاقة بين البشر والذباب أو الديدان المسطحة (flatworms) وزقّاق البحر كانت مستبعدة! وكان هذا التصوّر منتشراً لدرجة أن عالم الأحياء التطوّرية وأحد مهندسي النظرية التركيبية الحديثة إرنست مَيَر كتب في الستينيات:

> «إن المعارف الكثيرة التي اكتسبناها حول فسيولوجيا الجينات تؤكد بصورة قاطعة أن البحث عن «الجينات المتنادِدة» بين الحيوانات عملية عقيمة جداً إن استثنينا الأنواع ذات القرابة الكبيرة. فإذا تطلبت الطبيعة حلاً فعالاً واحداً لحاجة وظيفية فإن مجموعات مختلفة جداً من الجينات ستقدّم ذلك الحل، بغض النظر عن الطرائق التي ستسلكها. إن مقولة «كل الطرق تؤدي إلى روما» صحيحة في التطوّر بقدر ما هي صحيحة في حياتنا اليومية».

كان هذا التصوّر خاطئاً بالكامل! في كتابه البارز [**بنية نظرية التطور**] *The Structure of Evolutionary Theory* نظر ستيفن جاي جود إلى اكتشاف عناقيد جينات Hox وجينات بناء الجسم باعتباره انقلاباً في تصوّرات الأحياء التركيبية الحديثة، يقول: «لا تكمن الأهمية الأساسية لفهمنا الجديد لجينات النموّ في كونها اكتشاف شيء كان مجهولاً تماماً...

بل في الطبيعة غير المتوقعة لهذا الاكتشاف وفي التنقيحات والإضافات التي سيفرضها على نظرية التطوّر».

لم يتكشَّف أن الجينات المتناددة موجودة فحسب (وهو ما يغير الجزء الأبسط من نبوءة مَيَر الخاطئة) بل أنه لا توجد عدة طرق إلى روما (إلى التكيّف التطورّي مثالاً) كما اعتقد البعض. إن قصة *باكس 6* توحي بأن مختلف أنواع عيون الحيوانات سلكت طريق *باكس 6*، ولم يلجأ الانتخاب الطبيعي إلى تصنيع عدة أعين من الصفر. هناك مكوّنات جينية عامة تدخل في صناعة كل عين تماماً كما هو الحال في الأنواع المختلفة من الزوائد أو القلوب وسائر الأجزاء الأخرى. لا بد أن هذه المكوّنات الجينية المشتركة قد وجدت، قبل ظهور الفقاريات والمفصليات، في حيوانات استخدمتها لتكوين أبنية تساعدها على الرؤية أو الاستشعار أو الأكل أو الحركة. هذه الحيوانات هي الأسلاف البعيدة لمعظم الحيوانات المعاصرة، والبشر. بحوزتي الكثير لقوله عن تلك الأسلاف ومسار تطوّر الحيوان في الفصل السادس، لكنني أحتاج قبل ذلك إلى الاستفاضة حول بعض أنواع الجينات الأخرى الموجودة في عُدة الأدوات الجينية. بحوزتي أيضاً مجموعة أخرى من العلاقات المدهشة وغير المتوقعة أكشف عنها.

تحديد عُدة الأدوات

لعل جينات Hox والجينات الداخلة في بناء العيون والأطراف والقلوب (حوالي دزينة جينات) هي أشهر الجينات الحاكمة، إلا أنها في الحقيقة مجرد جزء من مجموعة الجينات التي تشكل عُدة الأدوات

الجينية لنموّ الحيوانات. إذ إن هناك بضع مئات من الجينات مكرّسة لبناء وتنميط ذبابة الفاكهة، وهذا العدد يعتبر جزءاً ضئيلاً من 13,767 جيناً تشكل مجموع جينوم الذبابة. بقية هذه الجينات التي تشكل القسم الأكبر تضطلع بالأعمال الروتينية والوظائف المتخصصة في خلايا ذبابة الفاكهة.

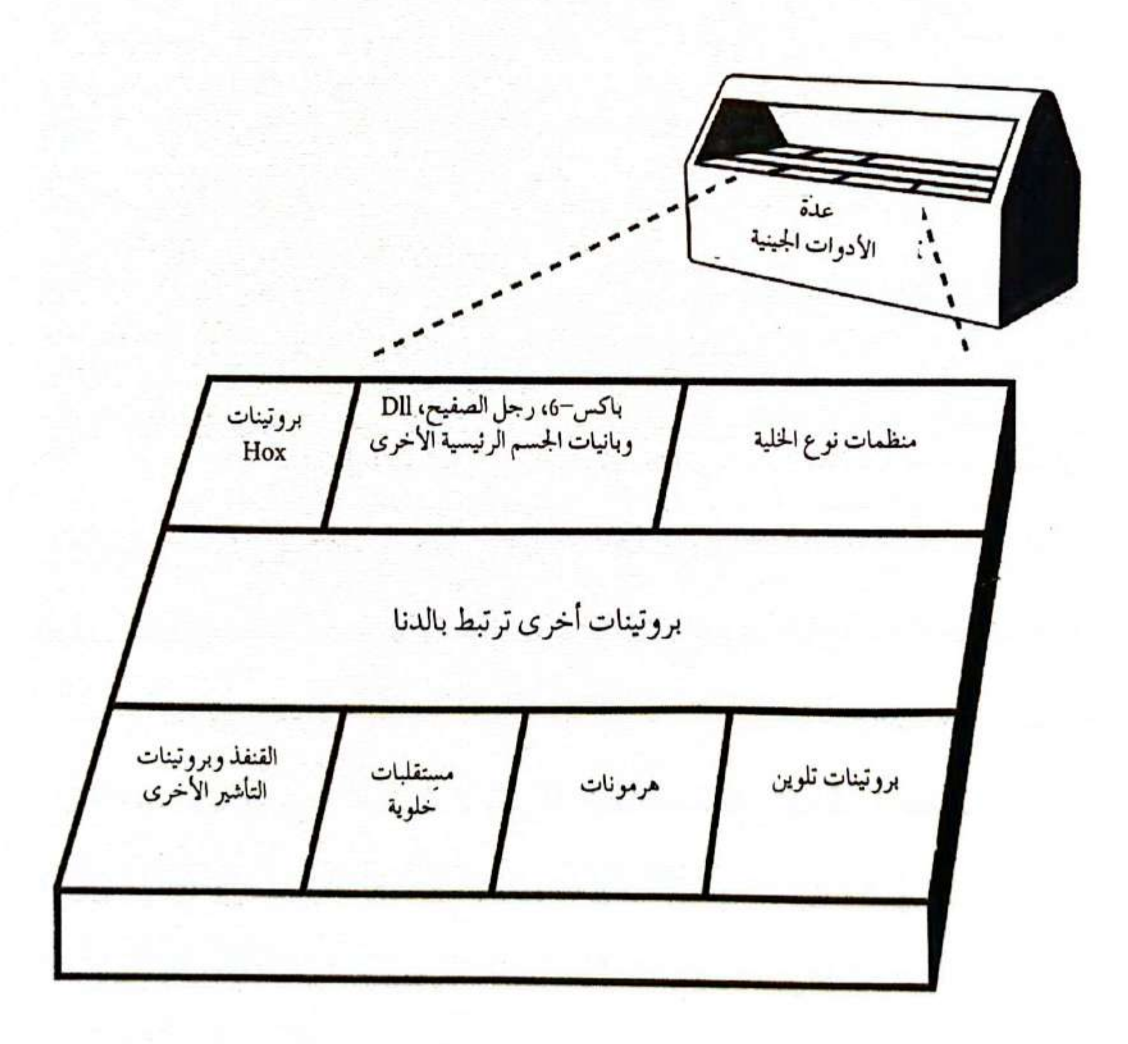
إن وسيلتنا لمعرفة أغلب جينات عُدة الأدوات هي من خلال المقاربة ذاتها التي أمطنا بها اللثام عن أوائل جينات بناء الجسم وذلك بعزل الطافرات ذات الشذوذات. في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات بدأ عالما جينات هما كريستيانه نوزلاين فولهارد (Christiane Nüsslein–Volhard) وإيرك فيشهاوس (Eric Wieschaus) في تحديد جميع الجينات الضرورية لبناء يرقة ذبابة الفاكهة. ووجدا عشرات من الجينات الضرورية لبناء العدد والنمط الصحيحين من فصوص الجسم، وأخرى ضرورية لتكوين طبقات الأغشية الثلاث في اليرقة، وأخرى ضالعة في تنميط التفاصيل الدقيقة أو زخرفة الحيوان. سأقول الكثير عن هذه الأنواع المختلفة من الجينات بعد قليل لكن النقطة المهمة التي أود الإشادة بها هنا هي أن جهود نوزلاين فولهارد وفيشهاوس كانت منهجية ومنظمة جداً وبسبب ذلك نجحا في تحديد أغلب الجينات التي نعرفها الآن والتي تدخل في بناء جسم الذبابة. أضف إلى ذلك أن لهذه الجينات مثيلات في الفقاريات والحيوانات الأخرى، اكتشفت هذه المثيلات بفضل عملهما الرائد في ذبابة الفاكهة. وقد حصلت نوزلاين فولهارد وفيشهاوس وإد لويس (Ed Lewis) على جائزة نوبل في الطب أو الفسيولوجيا في عام 1995 لاكتشافاتهم التي

عبدت الطريق لعلم الأجنة، وبالتالي للإيفوديفو.

أكثر ما ميّز مجاميع نوزلاين فولهارد وفيشهاوس من طافرات الذباب هو أن بها عيوباً دراماتيكية ولكن متمايزة (discrete) في تنميطها وتعضيتها لجنين الذبابة. على سبيل المثال فقدت بعض الطافرات وحدات كاملة من الفصوص (segments) بينما كوّن بعضها الآخر نصف عدد فصوص الذبابة الطبيعية فقط. هذه الجينات إذاً تؤثر في المداول التشريحية (anatomical modules) الأساسية (الفصوص التي تشكل جسم الحشرة). في مجموعة ثالثة من الطافرات، يتم الإخلال بنمط ثابت بعملية الاستقطاب في كل فص، بحيث تؤثر هذه الجينات في الكيفية التي يتشكل بها النمط في المداول. ولم تظهر في جميع أصناف الطافرات أي حالة تنهار فيها عملية النموّ بأكملها، بل إن ما يظهر هو انقطاع عملية واحدة فقط فيما تواصل بقية العمليات طريقها بصورة طبيعية.

لقد أصبحنا نعرف الكثير عن أفراد الجينات في عُدة الأدوات، فمحتويات هذه العُدة تؤثّر في عملية النموّ من خلال تشغيل أو إيقاف الجينات الأخرى على طول مسار عملية النمو (الشكل 7,3). تشكل *عوامل النسخ* (*transcription factors*) قسماً كبيراً من عدة الأدوات وهي بروتينات ترتبط بالدنا وتشغل أو توقف عملية نسخ الجين مثل الجينات الحاكمة التي وصفتها سابقاً. نوع آخر من محتويات عدة الأدوات ينتمي لما يسمى سبل التأشير (signaling pathways). تتواصل الخلايا فيما بينها بإرسال إشارات على هيئة بروتينات تغادر الخلية مسافرة بعيداً عن مصدرها، وتلتصق بمستقبلات (receptors) على جدران خلايا أخرى

مطلقة شريطاً من الأحداث مثل التغيّر في شكل الخلية، أو الهجرة أو بدء الانقسام أو إيقافه، أو تنشيط الجينات أو كبحها. وفيما ينمو النسيج تعمل الإشارات بين جموع الخلايا على تشكيل الأنماط الداخلية في البناء النامي. هناك عدد معقول من هذه السبل في ذبابة الفاكهة (حوالي العشرة) ولكل سبيل عدة مكوّنات هي الإشارات والمستقبلات والعديد من الوسطاء. هذه المكوّنات تمرّر الإشارة عبر أجزاء الخلية المختلفة، من غشاء الخلية إلى السيتوبلازم إلى النواة. ويمكن أن تؤدّي الطفرات في هذه المكوّنات إلى إعاقة الإشارة وبالتالي تعطيل عملية النموّ.



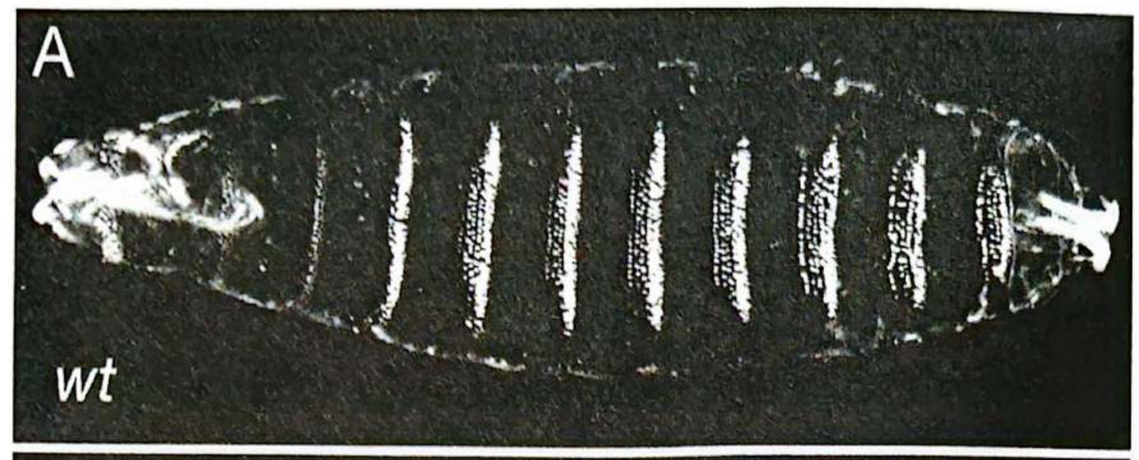
الشكل 7,3 **عدة أدوات نموّ الحيوان.** يتم التحكم في بناء وتنميط أجسام الحيوانات من خلال أنواع مختلفة من بروتينات عُدة الأدوات. (رسم جوش كليس).

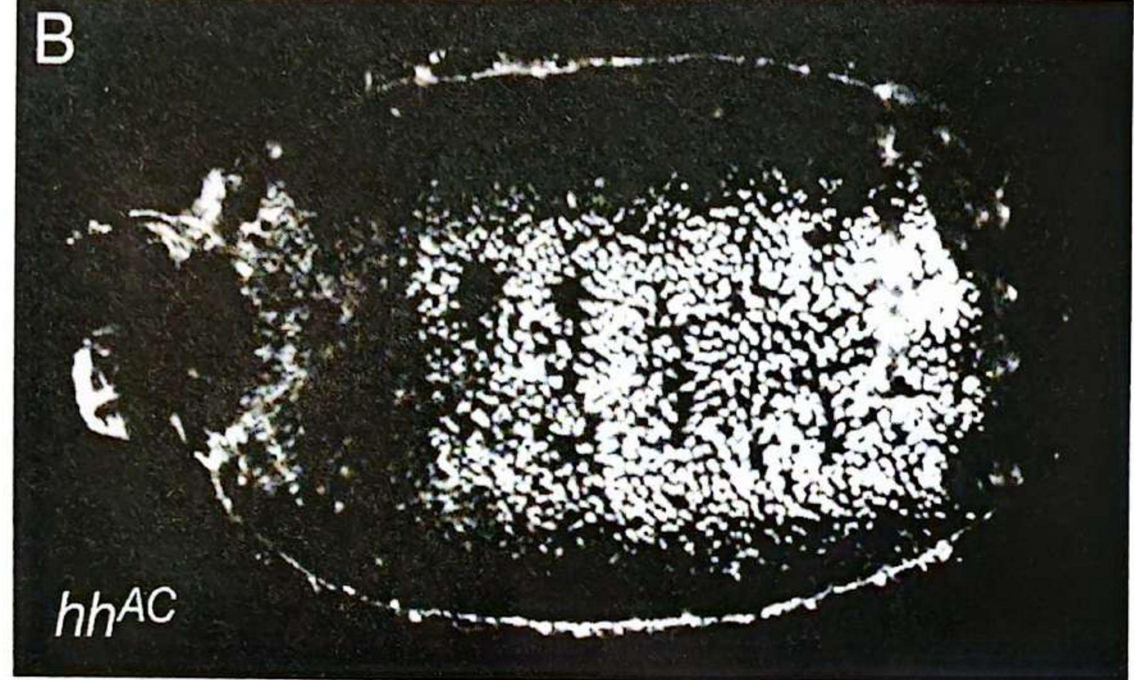
بعد أن تلقّف علماء الأحياء فكرة أن الجينات المستخدمة من قبل ذبابة الفاكهة مستخدمة أيضاً من قبل الفقاريات، أخذوا في كل مرة يُكتشف فيها جين في عُدة أدوات ذبابة الفاكهة بالبحث عن نظير له في الفقاريات. قاد ذلك إلى اكتشافات عظيمة سأختم هذا الفصل بأكثرها إدهاشاً وإثارة.

من القنافذ إلى العنش

والصقلوب والسرطان

صنّفت نوزلاين فولهارد وفيشهاوس الطافرات بطريقة منهجية بناء على التأثير الظاهري الذي يمارسه الجين على يرقة ذبابة الفاكهة، ومنحا اسماً لكل صنف من الطافرات بناء على هذا التأثير. وأضافت هذه الأسماء الوصفية الملفتة، كثير منها بالألمانية بسبب وجود المختبر في توبنجن (Tübingen) رونقاً إلى إغراء جينات ذبابة الفاكهة. فكان هناك جين باسم *الطفل* (*knirps*) وجين باسم *المعاق* (*Krüppel*) وآخر *المشير* (*spitz*) وأسماء إنجليزية مثل *الطفل الحليق* (*shavenbaby*)، والرأس الزر (*buttonhead*) و*الكرة الصغيرة المذعورة* (*faint little ball*) وأسماء أخرى كثيرة. أحد الأنواع المفضّلة من هذه الجينات هو *القنفذ* (*hedgehog*)، سمي بذلك لأن اليرقة الطافرة تظهر كالقنفذ مغطاة بشعر دقيق (الشكل 8,3). القنفذ جزيء مهم للكثير من العمليات في ذبابة الفاكهة إلا أن أهميته وشهرته تعاظمت عندما انخرطت عدة فرق من الباحثين في البحث عن جين *القنفذ* في الفقاريات.





الشكل 8,3 **سطح يرقة ذبابة طبيعية وأخرى بها جين القنفذ الطافر.** تتجمع الشعيرات في الطافر ويختل نظامها مكوّنة ما يشبه مظهر القنفذ الخارجي مقارنة بأحزمة الفصوص الموزعة بالتساوي في اليرقة الطبيعية. (تقدمة ـ د.بينيديكيت سانسون (Bénédicte Sanson)، جامعة كامبريدج).

توجد ثلاثة أنواع من جين *القنفذ* في الفقاريات، وتمشياً مع الروح المرحة لأسماء جينات ذبابة الفاكهة فقد سمي الأول *بالقنفذ الصوتي* (*Sonic hedgehog*) (تيمناً باسم شخصية لعبة الفيديو الشهيرة) أما الثاني والثالث فحصلا على اسمي *القنفذ الصحراوي* (*Desert hedgehog*)

و*القنفذ الهندي* (*Indian hedgehog*) (الحيوانان المعروفان). وحصد كليف تابين (Cliff Tabin) أول القطاف عندما بحث هو وزملاؤه في كلية هارفرد الطبية كيف ينشط *القنفذ الصوتي* خلال عملية نموّ طرف الدجاجة. ووجدوا أن الجين يُشغّل في الحافة السفلية فقط من برعم الطرف. وعلى نحو مثير كان هذا قريباً من منطقة النشاط الاستقطابي (zone of polarizing activity) التي حدّدها ساندرز في تجارب الازدراع التي أجراها قبل عدة عقود. عمد الباحثون إلى استخدام حيل عديدة لتشغيل جين القنفذ *الصوتي* في مناطق أخرى من برعم الطرف وذلك لاكتشاف الإمكانات المختلفة لدوره في منطقة النشاط الاستقطابي، ووجدوا نمط العنش ذاته الذي اكتشفته ساندرز؛ أي أصابع إضافية تتشكّل عبر قطبية معاكسة. لم تكن منطقة عمل جين *القنفذ الصوتي* جزءاً من منطقة النشاط الاستقطابي بل كانت هذه الأخيرة بأكملها نتيجة لنشاط هذا الجين، واتضح أن أهمية جين *القنفذ الصوتي* أكبر من قصص الدجاج.

هل تذكرون ما قلناه سابقاً حول البشر الذين يولدون بست أصابع؟ من الواضح الآن أن هذا النوع من العَنَش ناجم عن طفرة تؤثر في تفعيل جين *القنفذ الصوتي* خلال مرحلة نموّ الطرف البشري. وهذا ليس مثالاً رائعاً على تشابه أطراف الفقاريات المختلفة فحسب، بل هو مثال عظيم على الكيفية التي يؤدي بها اكتشاف واحد في ذبابة الفاكهة إلى دفع الطب الجيني البشري خطوات واسعة إلى الأمام.

وهناك المزيد أيضاً:

ذكرنا سابقاً الخروف المصقلب (تلك الصورة التي تصعب إزالتها

من الذهن) ومادة السايكلوبامين الماسخة، صرنا نعرف الآن أن السايكلوبامين يثبّط سبيل التأشير لجين *القنفذ الصوتي* في الثدييات؛ إنه يسدّ جزءاً من مستقبِلٍ خلوي معين بحيث تعجز الخلية عن الاستجابة لبروتين هذا الجين. هناك مكان آخر تتجلى فيه أهمية إشارات *القنفذ الصوتي* في نموّ الفقاريات، تحديداً على طول خط الوسط البطني (ventral midline) للجنين النامي، فالإشارات الصادرة من خلايا الصفيحة القاعية حاسمة في عملية تنميط الأنسجة العلوية (overlying tissues) وتمايزها إلى الأجزاء اليمنى واليسرى للعين والدماغ. عند التعرّض للسايكلوبامين في التوقيت الذي يحدث فيه هذا التمايز تتعرقل الخطوات الاعتيادية ويولد الحمل بعين واحدة. وبينما لا يتعرّض الجنين البشري للسايكلوبامين إلا أن الإيثانول قد يسبب تأثيرات شبيهة، فمتلازمة الجنين الكحولي (Fetal alcohol syndrome) تنتج بسبب التعرّض للتسمم بالكحول في مرحلة معينة من مراحل الحمل البشري مؤدياً إلى «اندماج مقدِّم الدماغ» (holoprosencephaly). إن الطفرات التي توقف نشاط *القنفذ الصوتي* أو أي مكوّن من مكوّنات السبيل التأشيري تؤدي إلى التصقلب.

تعتبر العيوب الخلقية مثالاً على خلل بجينات عُدة الأدوات في الفقاريات، هناك مثال آخر هو السرطان. فالورم السرطاني ينمو عندما تنقسم الخلايا بحرية بعيداً عن كوابحها الداخلية أو الخارجية، وذلك بحدوث شذوذ أو انحراف في الاستجابة للإشارات الخلوية. أحد الأمثلة القريبة هو سرطان الخلايا القاعدية (basal cell carcinoma) وهو السرطان الأكثر إصابة لـلجلد وتحديداً في الوجه والعنق عند

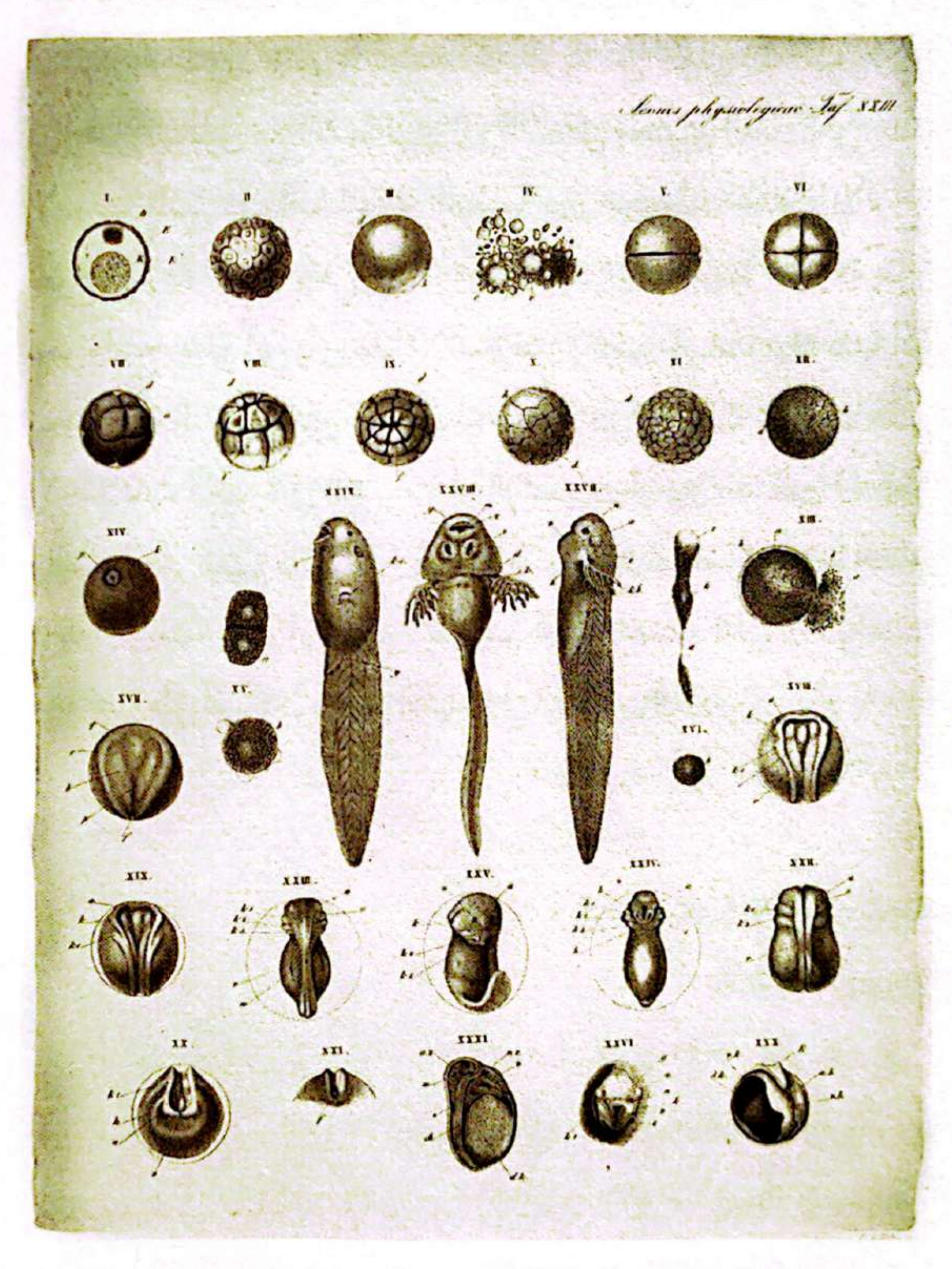
الأشخاص المعرّضين للشمس كثيراً. أغلب الخلايا في هذه الأورام تحمل طفرات في جينٍ أحد مستقبلات *القنفذ الصوتي*، وتسبّب هذه الطفرات نشاطاً زائداً في سبيل التأشير. ولهذا فإن إحدى طرق العلاج الكيميائي للمرض إدخال مادة تثبّط سبيل تأشير جين *القنفذ الصوتي*، ومن هذه المواد، التي ربما عرفتها الآن، السايكلوبامين. إنها رحلة علمية حقاً من الحملان الجهيضة إلى السموم النباتية، إلى العلاج الكيميائي للبشر. وهناك أيضا بعض سرطانات الدماغ والبنكرياس تعالج بعناصر تؤثر في سبيل تأشيرِ جين القنفُذ بسبب ارتباطها بطفرات فيه.

أشك في أن العَنَش والتصقلب والسرطان كانت ضمن اعتبارات نوزلاين فولهارد وفيشهاوس عندما بدأا العمل على أجنة ذباب طافرة في نهاية السبعينيات. لكن تأثير اكتشاف عدة الأدوات الجينية في الذباب بلغ ما لم يكن في حسبان أحد. والآن ومع هذا الفهم المنتشر لإرثنا الجيني المشترك يلجأ علماء الطب والجينات عادة إلى الذباب والأنواع الحيوانية «الدُنيا» بحثاً عن أي إشارة تفيدهم في دراسة أمراض الإنسان.

مفارقة عدة الأدوات وأصول التنوّع والاختلاف

إن اكتشاف عدة أدوات مشتركة أعاد تأطير وصياغة الطريقة التي يجب أن نفكر فيها حول تطوّر التنوّع. نعرف الكثير عن جينات عُدة الأدوات في حيوانات عديدة، ويخبرنا توزيع هذه الجينات داخل عدة الأدوات أن هذه العُدة وجدت منذ أزمنة سحيقة سبقت تطوّر أغلب أنواع الحيوانات. نعرف أيضاً المتواليات الكاملة لجينومات الذباب

والديدان الممسودة (nematode worms) وجينومات فأر وإنسان وسمكة وبضعة حيوانات أخرى. المقارنة بين هذه الجينومات لا تخبرنا فقط أن الذباب والبشر يتقاسمون مجموعة كبيرة من جينات النموّ، بل أن للبشر والفئران مجموعات متطابقة تقريباً من حوالي 29 ألف جين، فيما يصل التطابق مع الشمبانزي إلى 99٪ على مستوى الدنا. لكن عدة الأدوات المشتركة والتشابهات العظيمة بين جينومات مختلف الأنواع تطرح مفارقة مهمة، وهي بما أن هذه التشكيلات الجينية مشتركة على نحو واسع، فمن أين يأتي هذا الاختلاف؟ وكيف لجينات *Hox* ذاتها أن تنحت هذا التنوّع الكبير في مفصليات الأرجل؟ وكيف تطوّرت هذه الاختلافات الكبيرة في الثدييات أو الرئيسيات أو بين النسّانين (apes) والبشر؟ حتى نفهم كيف تبنى هذه الأجسام المختلفة تشريحياً باستخدام ذات الجينات، يجب أن نفهم كيف يتم تجميع أعضاء الحيوان الواحد. هذه قصة طويلة ستكون محل اهتمامنا في الفصلين القادمين.



مراحل نمو ضفدع. (أخذت من أ. إيكر، «أيقونات فيزيولوجية: لوحات إيضاحية»

(A. Ecker, *Icones Physiologicae: Erläuterungstafeln*

الفصل 4

صناعة الأطفال: 25,000 جين، بعض التجميع مطلوب

«رؤية شيء مرة واحدة خير من السماع عنه مائة مرة»

مثل صيني

إنها ليلة ربيعية من ليالي كولورادو، الوقت متأخر جداً والصمت يخيّم على المختبر. وأنا أكرّر الخطوات ذاتها طوال الثمانية عشر شهراً الماضية. تملّكني شعور بالتوتر بعد أن غمرتُ المئات من أجنة الذباب البيضاء في سائل الأجسام المضادة (antibody) الذي أعددته في وقت سابق. كنت أدرك ما يجهله رئيس المختبر مات سكوت (Matt Scott)

أنها المحاولة الأخيرة. نفدت جميع حيلي، ولا أستطيع التفكير في أي طريقة إضافية أجري بها هذه التجربة، وإذا فشلت هذه المحاولة فإن كل ما سأخرج به هو عام ونصف من العمل المجدب. انتشرت أجنة الذباب على اللوح الزجاجي كحبات الأرز، وعندما عرّضتها للضوء الأزرق التمعت أشرطة خضراء تزيّن هذه اليرقات الفاتنة، مرحى! يجب أن أتصل بالرئيس، ونشرع في الاحتفال، يبدو أن العمل سيزدهر!

استرجاع الدجاجة

لقد وصفت سابقاً عُدّةَ الأدوات الجينية الخاصة بالنموّ، وكيف أن اكتشافها كان مدفوعاً بدراسة وحوش مذهلة تأتي إلى الدنيا بعدد غير صحيح من الأجزاء، أو ينمو أحد أجزائها في المكان الخطأ، أو يكون أحد أجزائها مفقوداً بالمرة. ولحسن الحظ تنجح الطبيعة غالباً في إنتاج الذباب والأطفال بعدد صحيح من الأجزاء، جميعها في الأماكن الصحيحة. لكن كيف يحدث ذلك؟ وكيف تحوّل هذه الجينات المدهشة بيضة بسيطة إلى حيوان معقد؟

يُحيل مفهوم «الاختزالية» (reductionism) في علم الأحياء إلى المسعى الذي يرمي لفهم عمليات الحياة على المستوى الجزيئي، وذلك يحدث عادة من خلال تفكيك أو اختزال العمليات والبنى إلى عناصرها الجزيئية. ولقد حقّقت هذه المقاربة نجاحات هائلة خلال النصف قرن المنصرم كاشفةً عن آليات الوراثة، وموضحة أسباب أمراض عديدة، ومؤسسة صناعة طبية يبلغ حجمها 500 مليار دولار تقدم طرقاً جديدة

للتشخيص والعلاج. لكن الاعتراض المتكرّر على هذه المنطق الاختزالي هو أن الكثير من الكينونات الأحيائية -كالخلايا والأفراد والجماعات والتجمعات البيئية -تنتظم في مستويات فوق جزيئية، بحيث أن المعرفة بالجزيئات وحدها لا تفسر خواص المستويات الأعلى؛ فتوفرنا على قائمة بجينات عُدة الأدوات لا يكفي لفهم كيف يُبنى الحيوان خلال النموّ، تماماً مثل أن معرفتنا بأن الحاسوب يتكوّن من السيليكون والموصلات الفائقة واللدائن لا تكفي لمعرفة كيف بُني أو كيف يعمل.

يحملنا ذلك إلى ذكريات تحفل بها حقبة سابقة عندما كان علماء الأجنة يعزلون تجمعات الخلايا بطرق قاسية، أملاً في معرفة الكيفية التي تتعضّى بها خلال النموّ إلى أنسجة وأعضاء. وقد صوَّر ذلك مرة بول ويس (Paul Weiss) عندما شرح المعضلة الاختزالية لزملائه من علماء الأجنة. عرض صورة لجنين دجاجة سليم، ثم جنيناً وُضع في خلاط، وأخيراً أجزاء جنين مهروسة بعد الخلط، ثم طرح ويس المشكلة بوضوح أمام الاختزاليين: كيف نسترجع تلك الدجاجة!

ليست عدة أدواتنا الجينية سوى قطع من مادتنا الجينية الكاملة؛ مجرد رقم صغير من 13,700 جينٍ في ذبابة الفاكهة أو 25,000 جينٍ في الثدييات. صحيح أننا حددنا الكثير من القطع الحاسمة، لكن كيف نسترجع تلك الدجاجة؟ أو حتى ذبابة؟ ينبغي أن يكون هذا التحدّي مألوفاً لكل من اشترى أو استلم لعبة أو جهازاً في صندوق كبير، ثم إذا فتحه عثر على كيس يحتوي على أجزاء متناثرة، وورقة تعليمات تحمل ثلاث كلمات رتيبة: «يلزم بعض التجميع». لقد وصفت في الفصل السابق كيف انتقل علماء الأحياء من دراسة حيوانات طافرة إلى اكتشاف

الجينات الحاكمة، سأركز في هذا الفصل على الاتجاه المعاكس؛ كيف ننتقل من الجينات إلى بناء الحيوانات؟

ستتولد الدهشات في هذا الفصل من صناعة ومشاهدة الخرائط. اعتبر ستيفن هول (Stephen Hall) في كتابه [**رسم خرائط الألفية القادمة: اكتشاف الجغرافيات الجديدة**] *Mapping the Next Millennium: The Discovery of New Geographies* صناعةَ الخرائط إحدى أولى مراحل الاستكشاف العلمي. لقد سعى العلماء بدءاً من الملاحين العظام في القرنين الخامس عشر والسادس عشر إلى الجهود الحالية في علم الفلك والفيزياء وعلم المحيطات إلى قياس وتصوير الكون والأرض والمحيطات بطرق جذابة وغنية بالمعلومات. وعلى نحو مشابه تمثل أجنّة الحيوانات هي الأخرى عوالم صغيرة تَرْسُمُ طوبولوجياتها المستقبلية جيناتُ عُدة الأدوات. لقد وفّر هول الاستعارة المناسبة التي جعلت من «جغرافيا» البيضة مبحثاً مركزياً في علم الأحياء، ومن خلالها سنصنع نوعاً جديداً من الخرائط.

لعبت الأدوات والتقنيات الجديدة دوراً حاسماً، في جميع الاستكشافات، في رؤية جوانب للمرة الأولى، سواءً في التحديق إلى أصقاع الكون أو في التلصص على الأعمال السرية في أجساد الكائنات الحية. ففي علم الأجنّة لم يكن اكتشاف عدة الأدوات الجينية مجرد تحديد لجيناتِ بناء الجسم، بل قدّم لنا طريقة جديدة كلياً للنظر إلى عملية النموّ. وعبر تصوّر جينات عدة الأدوات بصرياً وهي منهمكة في بناء الجنين نستطيع رؤية موقع وأشكال البنى قبل تكونها بفترة طويلة، كالأشرطة الخضراء التي رأيتها تلك الليلة في كولورادو. إن صور عدة الأدوات الجينية في الأجنّة تخلق خريطة واضحة وديناميكية لجغرافيا الجنين النامي

-وهي خريطة تكشف عن الترتيب والمنطق في الأسلوب التدرّجي لبناء الحيوانات المعقّدة من بيضة بسيطة عبر العمل التي تنجزه جينات عدة الأدوات.

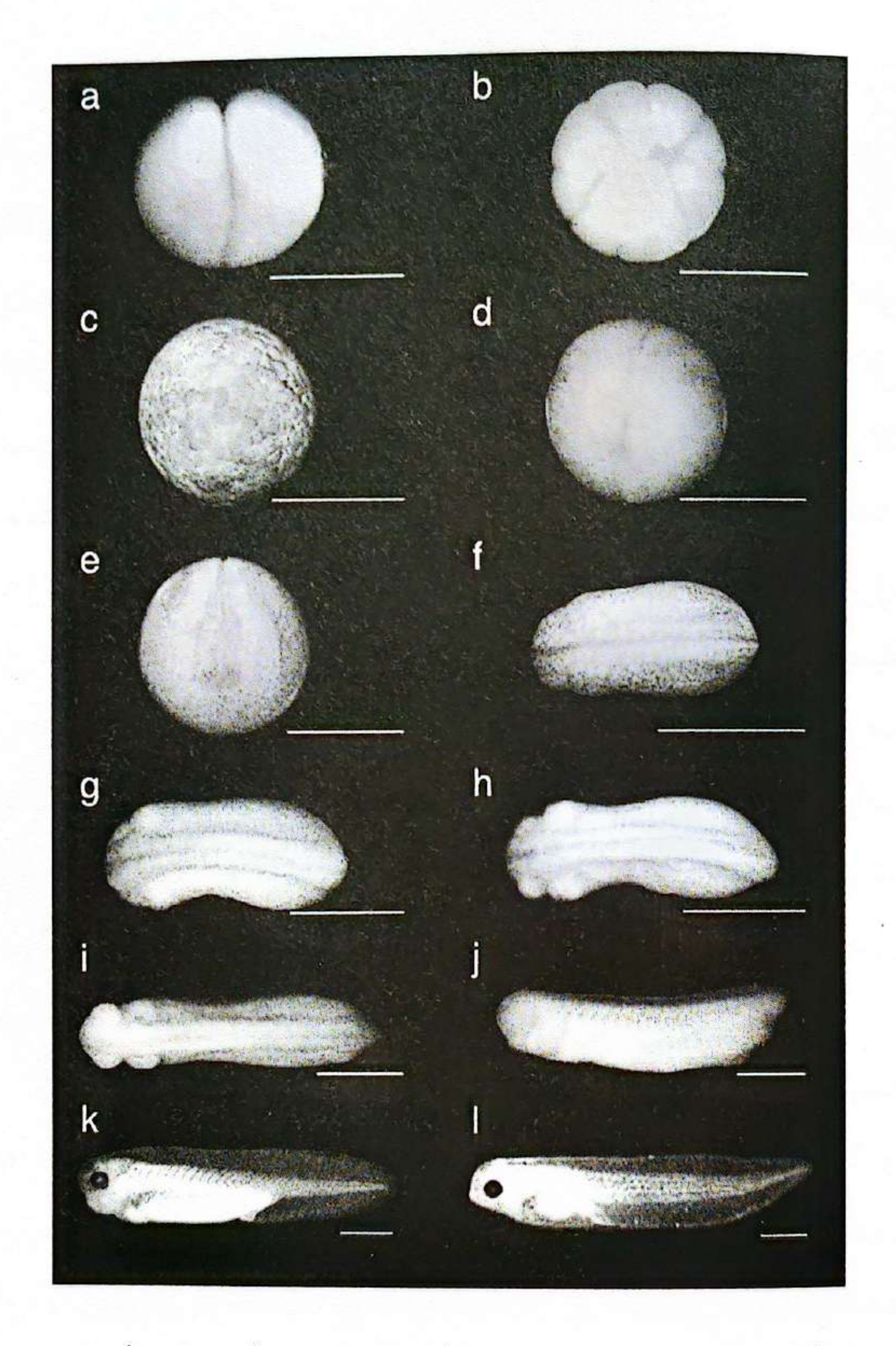
الخرائط الأولى

يشكّل مشهد النموّ- من بيضة بسيطة إلى حيوان معقّد- دراما مدهشة. عند الضفادع، تستغرق الرحلة من البيضة إلى شرغوف صغير أياماً قليلة، وتستغرق الأحداث الرئيسية فتراتٍ زمنية قصيرة تتراوح بين دقائقَ معدودة إلى بضع ساعات (الشكل 4 , 1). خلال ساعة واحدة أو أقل من الإخصاب (fertilization) تنشطر البيضة الكبيرة، وهي مجرد خلية واحدة كبيرة، إلى اثنتين. يليها بعد وقت قصير انشطارٌ آخر عمودي على الأول ليكون المجموع أربع خلايا، وتتابع الانشطارات ليصبح عدد الخلايا 8 ثم 16 ثم 32 وهكذا حتى تتشكل كرةٌ تتكدس جميع خلاياها على محيط الكرة من الخارج (محاطة بكمية كبيرة من صفار البيض الغني بالغذاء). ثم بعد حوالي تسع ساعات من الإخصاب تبدأ سلسلة أحداث درامية تعرف بتكوّن المُعيدة (gastrulation). وخلالها يكوّن الجنين طبقاته الثلاث: الطبقة الداخلية وتعرف باسم الأديم الباطن (endoderm) والأديم الأوسط (mesoderm) وأخيراً الطبقة الخارجية وهي الأديم الظاهر (ectoderm)، ستنمو هذه الطبقات لتكوّن الأنسجة والأعضاء (الجلد والعضلات والمعدة وسائر الأعضاء) الموجودة في مستويات متفاوتة داخل الجسم. ويكوّن الجنين المُعيدة عبر تكوين جيب بحيث تتحرّك أغلب الخلايا الموجودة في الخارج إلى

الداخل. وبمضيّ حوالي نصف يوم من إخصاب البيضة يكون الجنين قد انقسم إلى طبقات الأنسجة الرئيسية الثلاث.

في الخطوة التالية يبدأُ تأسيس مناطق متمايزة داخل هذه الطبقات، فتظهر سلسلة من التغيرات الملحوظة في الجانب العلوي من الجنين لتكوّن لاحقاً الأنبوب العصبي (neural tube): الموقع المستقبلي للدماغ والنخاع الشوكي. وبانقضاء يوم واحد فقط تحدّد التغضنات والنتوءات المناطق التي ستكّون الرأس والعينين والذيل لاحقاً، وتبدأ بعد ذلك الأعضاء والزوائد بالتشكل، وتتكوّن الزعنفة الظهرية (dorsal fin) في اليوم الثاني وتتلوّن العينان وينمو القلب والجهاز الوعائي وتصبح كريات الدم الحمراء واضحة مع مطلع اليوم الثالث. ويظل الشرغوف تحت الماء حتى اكتمال نموّ الأطراف ويعاد امتصاص الذيل، وتدريجيا يأخذ الشرغوف شكل الحيوان البالغ.

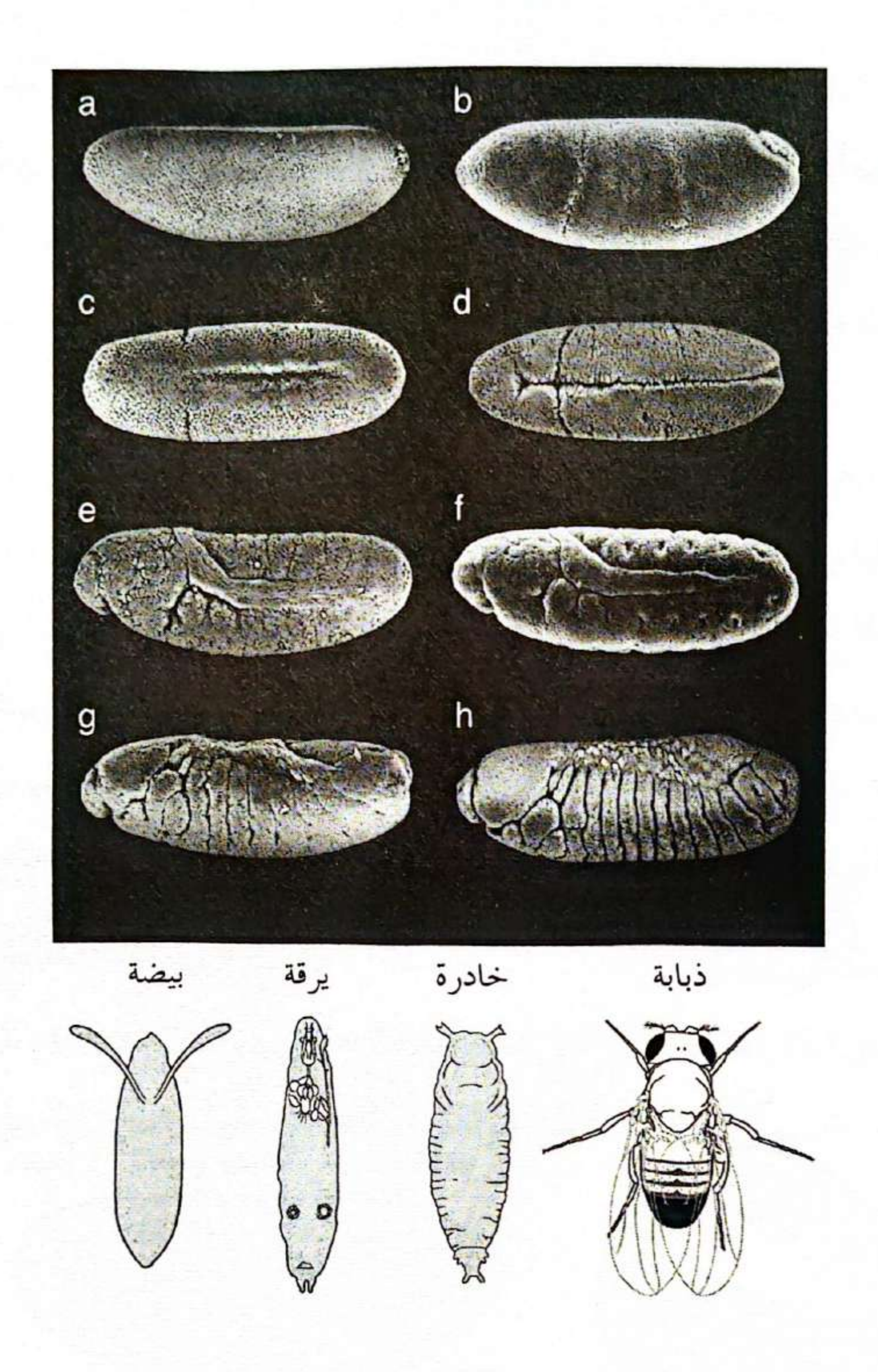
صناعة يرقة الذبابة مهمة عاجلة هي الأخرى (الشكل 2,4). تبدأ البيضة المستطيلة للذبابة بنواة واحدة مخصّبة وفي غضون ساعات معدودة تتشكل صفيحة صلبة من 6000 خلية تحيط بكتلة الصفار الداخلية، ثم يدخل الجنين في مرحلة تكوّن المُعيدة، مكوّناً الطبقات الداخلية والوسطى والخارجية. ويبدأ جذع الجنين بالاستطالة فيما تظهر الأخاديد سريعاً ناحتة نمطه الفصّي. وتتشكّل في هذا الجنين البالغ من العمر نصف يوم عدة أعضاء، وتتحدّد جيوب من الخلايا ستمثل البنى المستقبلية للحيوان البالغ. وفي يوم واحد من تخصيب البيضة تُولد يرقة حَرِكة نهمة. وسينمو هذا الحيوان سريعاً، وينسلخ مرتين ليغدو خادرة (pupa). وبانحسار اليوم التاسع تقريباً يكون ذبابة كاملة.



الشكل 1,4 **نمو شرغوف ضفدع**: صور أجنة، مرتبة من الأصغر إلى الأكبر، تتضمن الانشطار الأول للبيضة (a)، تكون الأريمة ((c) blastula)، تشكيل الطبقات الداخلية للجنين (d.e)، تشكيل النظام العصبي والجُسيدات (f-i)، تكون العينين ولونهما في الشرغوف (h-l) (الصور تقدمة ويل جراهام (Will Graham) وباربارا لوم (Barbara Lom)، كلية ديفيدسون).

تمثّل أجنّة الضفادع ويرقات الذباب لقمة سائغة للمفترسين؛ فاكتمال النموّ رهين بالقدرة على النجاة، ومن بين مئات البيوض التي تضعها الأنثى يصل جزء منها فقط مرحلة البلوغ. بالمقابل فإن الإنسان يعيش بيئة مختلفة، وينمو محاطاً بحماية قصوى. وتنقسم خلاياه، في البداية على الأقل، بسرعة أبطأ، فالانقسامات الأولية للبيضة المخصبة تحدث كل عشرين ساعة بحيث يستغرق وصول عدد خلايا الجنين البشري إلى 32 خلية المدةَ الزمنيةَ ذاتها التي يحتاج إليها اكتمال نموّ شرغوف، ولا يحدث تكوّن المُعيدة حتى اليوم الثالث عشر تقريباً. ويحتاج الجنين البشري إلى ثلاثة أسابيع لتكوين منطقة رأس متمايزة. وتتكون انتفخات فصية مزدوجة على طول ظهره والتي ستميزه باعتباره من الفقاريات (تعرف هذه الانتفاخات بالجُسيْدات (somites) وهي التي ستُنشِّئُ الفقرات والعضلات والجلد المحيط بها) وعندها يكون طول الجنين البشري حوالي 2,5 ملم، وستكون هناك ثمانية أشهر أخرى (طويلة!) حتى موعد الولادة.

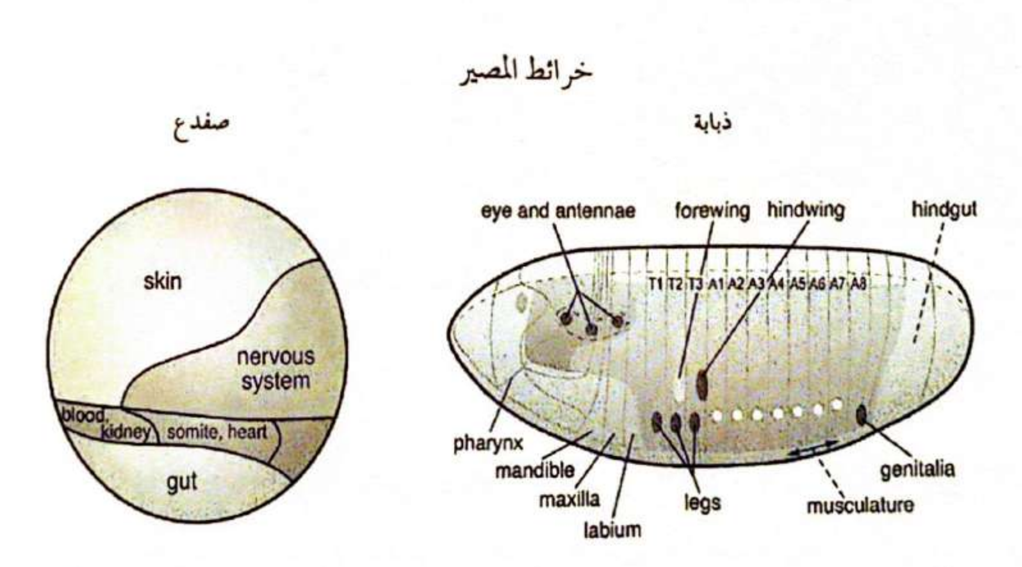
تتقافز عدة أسئلة بديهية أمامنا عند مراقبة جنين وهو ينمو. كيف يعرف الجنين أي جزء منه سيكون الرأس، وأي جزء سيكون الذيل؟ أو أين سيكون الجزء الأعلى والجزء الأسفل؟ كيف يقرّر أين تكون الأعين أو الأرجل أو الأجنحة؟ وإذا فكّرنا قليلاً في المستقبل المحتمل لهذه الخلية الأولية للبيضة الملقحة التي ستنمو لتكوّن العضلات والأعصاب والدم والعظم والجلد والكبد وسائر الأعضاء والأنسجة، فلعل السؤال الذي سيُطرح هو كيف يتحقق هذا المستقبل على أرض الواقع؟ وفي أي مرحلة من النموّ الجنيني يُحسم مصير خلية ما؟



الشكل 2,4 **نموّ جنين ذبابة، ودورة حياتها:** في الأعلى صور بالمجهر الإلكتروني توضح النموّ التدريجي لجنين الذبابة تتضمن تشكيل الطبقات الداخلية للجنين (a-d)، وتكوّن فصوص الجسم، (e-h) وتستغرق التطورات في (a–h) أقل من اثنتي عشرة ساعة. في الأسفل، تفقس البيضة متحولة إلى يرقة تنمو وتمر بعدة انسلاخات قبل أن تغدو خادرة، ثم تتحول إلى حشرة بالغة بعد عدة أيام (الصور تقدمة رودي تيرنر (Rudy Turner)، جامعة إنديانا، رسم ليان أولدز).

دفعت هذه الأسئلة المغرية روّاد علم الأجنّة العظام إلى البحث عن الإجابات مستخدمين التجارب الأبسط للتلاعب بالأجنّة. ولأسباب عملية اختاروا أجنّة الأنواع المتوافرة بكثرة، والتي يسهل العمل عليها ويمكن مراقبة نموها، وهي الحيوانات المائية عادةً مثل قنافذ البحر والبرمائيات حيث تنمو بيوضها بسرعة في ظروف محيطة بسيطة. وكان من أوائل الأسئلة التي طرحها علماء الأجنّة السؤال عن ماهية البنى التي ستنتجها لاحقاً الخلايا الموجودة في المناطق المختلفة من الجنين حديث التكوّن. طُورت تقنيات مختلفة لهذا الغرض، لكن أكثرها فاعلية ووضوحاً كان صبغ أفراد الخلايا بصبغة كيميائية غير ضارّة ومراقبة أين سينتهي المطاف بهذه الخلية والخلايا المنقسمة منها. وقاد ذلك علماء الأجنّة إلى بناء خرائط للجنين تكشف المواقع النسبية[1] لهذه الخلايا التي ستشكّل بنية ما. سميت هذه الخرائط بخرائط المصير (fate maps).

خرائط المصير



الشكل 4,3 **خرائط المصير**: خرائط المصير لجنين ضفدع وجنين ذبابة متكوّنين حديثاً، الأجزاء المستقبلية التي ستنمو من مناطق مختلفة محددة على الخارطة. (رسم ليان أولدز).

(1) الموقع النسبي هو نقطة تُحدد باعتبار بعدها عن نقطة أخرى أو أكثر. المترجمان

بناء على تجارب وضع خرائط المصير، رُسمت أطالسَ لأجنة العديد من الحيوانات. وكما حُددت خطوط الطول والعرض في الكرة الأرضية، حُدّدت إحداثيات للجنين نستطيع من خلالها التعرّف إلى المواقع المستقبلية للأنسجة والأعضاء والزوائد. يوضح الشكل 3,4 خارطتين لجنين الضفدع والذبابة (استخدمت تقنيتان مختلفتان لرسمهما لكن الفكرة واحدة). في جنين الضفدع نستطيع رؤية أن البشرة (epidermis)، والجهاز العصبي والنسيج المكوّن للدم والقلب والحبل الظهري والأديم الباطن (الذي يشكّل البنكرياس والأمعاء) تأتي من خطوط طول وعرض معيّنة في الجنين الحديث التكوّن.

يمتلك جنين الذبابة شكلاً مختلفاً عن الجنين الكروي للضفدع، فهو يشبه كرة الرجبي أو كرة القدم الأمريكية. لكن الأجزاء المختلفة للذبابة البالغة تأتي أيضاً من إحداثيات منفصلة في خارطة الجنين، ونستطيع أن نرى في الخارطة أن البنى التي ستتشكل لاحقاً في مواقع مختلفة على طول محاور جسم الذبابة تنشأ من مواقع مختلفة على طول محاور الجسم في الجنين الحديث التكوّن.

جغرافيا الجنين

كشفت خرائط المصير أن الخلايا، في مرحلة من مراحل النمو، «تعرف» موقعها داخل الجنين، وإلى أي نسيج أو بنية تنتمي. وباستخدام مصطلحاتنا الجغرافية فإن الخلايا والأنسجة والأعضاء تمتلك موقعاً محدداً في الكرة الجنينية، وكل موقع مُعرّف باستخدام خطوط الطول

والعرض والارتفاع (في حالة نتوئها من الجسم) والعمق (داخل طبقات الجسم) تماماً كالانتماء لدولة ما في الخارطة (خلايا العصب، وخلايا الكبد .... إلخ). نعرف أن جميع الخلايا تتحدّر من خلية بيضة أولية مخصّبة، ومن الواضح تماماً أن جملةً هائلة من المعلومات يجب أن تولّد خلال عملية النموّ لاستحداث عناوين فريدة لعشرات من مختلف أنواع الخلايا والأنسجة والأعضاء على مواقع محدّدة من الجنين. كيف «تتعلّم» الخلايا معرفة مواقعها وهويّاتها؟ هذه هي المهمة الجماعية التي تسهر عليها جينات عُدة الأدوات. وهناك منطق ملموس وراء ترتيب عمل عدة الأدوات الجينية بحيث تُحدّد المواقع تدريجياً نزولاً إلى التفاصيل الأدق فالأكثر دقة.

أعرضُ في الشكل 4,4 المنطق العام لجغرافيا الجنين وذلك قبل تصوير الكيفية التي تؤدي بها الجيناتُ المهمةَ على أرض الواقع. تأمل جيداً هذه الأشكال قبل أن تواصل القراءة. الفكرة الأساسية هنا هي تصوّر الجنين ككرات أرضية تتحدد فيها المحاور تدريجياً ويعاد صقلها وتشذيبها في عدة خطوات لاحقة.

والآن دعونا نرى كيف تقوم جينات عدة الأدوات بالمهمة على أرض الواقع.

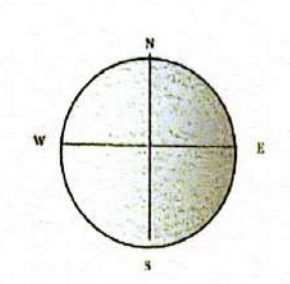
أشكال الأشياء المستقبلية:

جينات عدة الأدوات ورسم الأربطة والأشرطة والخطوط والبقع والنقاط والمنحنيات

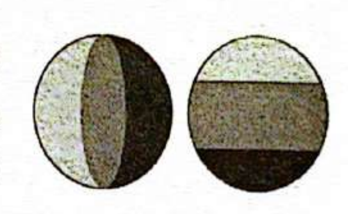
إن هندسة نظام إحداثيات الجنين بخطوط طولها وعرضها المتوازية والمتقاطعة تفرض نوعاً من التنظيم الفراغي (spatial order) للكيفية التي ينفذ بها برنامج جينات عُدة الأدوات. تظهر هذه الهندسة أيضاً من خلال خطوط كِفَاف[1] (contours) الجنين النامي التي تُنْحَت بشكل دوري روتيني مشكلةً منحنيات ملساء، وحاملة للعديد من الخواص الكروية. إن مجاميع الخلايا التي تصنع الانقسامات الرئيسية في الجنين أو تحدّد مواقع الأعضاء النامية وغيرها من الأبنية المتخصصة عادة ما تظهر في البداية كأشكال هندسية بسيطة -أربطة وأشرطة وخطوط وبقع ونقاط ومنحنيات -من نشاط عُدة الأدوات الجيني. علّق فرانسيس كريك، الحاصل على جائزة نوبل والمشارك في اكتشاف بنية الدنا، ذات مرة: «الأجنّة مغرمة جداً بالأشرطة». عبارة صحيحة لكن هذه الأشرطة وبقية الأشكال تتجاوز كونها صوراً مبهجة جمالياً لجينات عدة الأدوات وهي تعمل فيما تنمو الأجنّة، إنها تعكس العمليات الأساسية التي تبني تدريجياً معمار الحيوانات المعقّد من أنماط بسيطة هندسياً.

إن المنطق العام لطريقة عمل جينات عدة الأدوات في تعضيتها وتقسيمها وتحديدها ونحتها أجزاء الجنين، سواء في بناء ذبابة فاكهة

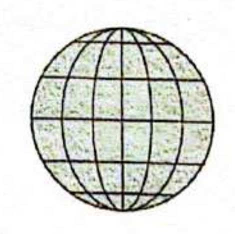
(1) الخطوط الكفافية أو الكنتورية هي خطوط تشير إلى الارتفاعات والانخفاضات مثل الهضاب والوديان ومقدار الانحدار في الرسم الطوبوجرافي. المترجمان



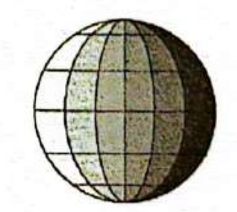
1 – تحديد الأقطاب
تحدد الأقطاب أولاً لإنشاء النظام الإحداثي للجنين؛ لكل جنين قطب شمالي (الأعلى) وقطب جنوبي (الأسفل) وقطب غربي (الرأس) وقطب شرقي (الذيل)، ويربط المحوران الرئيسيان في الجنين هذه الأقطاب.



2 – انقسام المحاور الرئيسية إلى أجزاء أصغر
ينقسم المحوران شرق–غرب وشمال–جنوب إلى مناطق خطوط الطول للمحور الأول وخطوط العرض للمحور الثاني، وتكون هذه الانقسامات كبيرة مبدئياً بحيث تُرسّم حدود نصفي الكرة الشمالية والجنوبية أو المناطق الشرقية والوسطى والغربية.



3 – تشذب الفترات (intervals) إلى سلسلة من المداول
تشذب خطوط الطول والعرض بحيث تصبح أصغر فأصغر تدريجياً، من 90° إلى 30° إلى 15° ... إلخ. وفي العديد من الأجنّة تُحدّد خطوط طول معينة المداول التشريحية التي تمثل لبنات البناء الأولية في تصميم الحيوان.



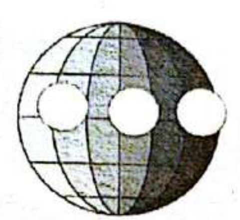
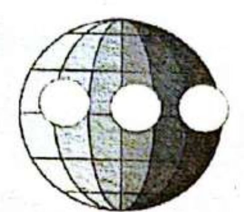
4 – تحديد هويات المداول المختلفة
تُميّز المداول المتشابهة مبدئياً بواسطة مواقعها على طول المحور شرق–غرب، ويوضع نظام من فترات خطوط الطول المنفصلة.



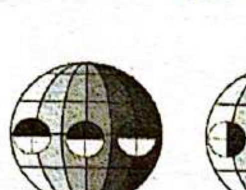
5 – تُشكّل «كرات» جديدة داخل الكرة الجنينية في إحداثيات محددة على خطوط الطول والعرض
تمثل مواقع الأعضاء والزوائد المستقبلية على خطوط الطول أهمية بالغة لمعمار الحيوان. وتحدّد هذه المواقع باستخدام خطوط الطول والعرض معاً. توظّف في البداية مجموعة صغيرة من الخلايا موجودة على إحداثيات محددة (مثلاً 30° غرباً، 10° جنوباً) لتشكيل بنى جسدية معينة، ويفترض بهذه الخلايا أن تتضاعف دراماتيكياً قبل أن يصل العضو أو الزائدة إلى حجمه النهائي، وتكون هذه البنى هي الأخرى ذات طبيعة مدولية. ومن أجل نحت شكل هذه البنى تُكرر الخطوات (1–4) في الأعلى داخل هذه الكرات أو العوالم الصغيرة كالتالي:

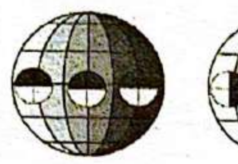
الشكل 4,4 المنطق العام لجغرافيا الجنين.

صناعة الأطفال

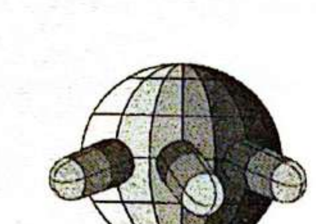
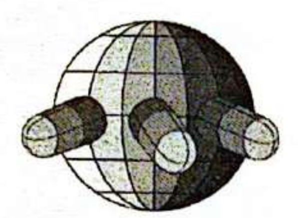



5أ– تحديد المحاور
يؤسس عادةً المحوران شمال–جنوب وشرق–غرب للأعضاء والزوائد باكراً بمجرد بدء البناء المستقبلي بالتمايز عن الخلايا المحيطة.

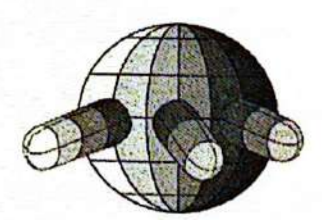
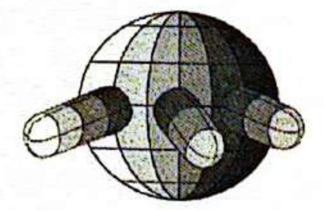




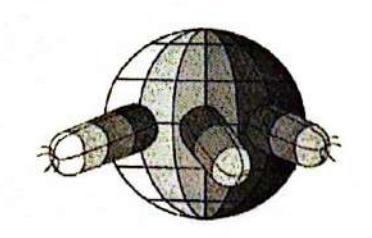
5ب– تقسييم المحاور الرئيسية إلى فترات
ينقسم المحوران الرئيسيان عادة إلى فترات.

5ج– يتشكّل المحور الثالث وتشذّب الفترات إلى مداول،
تبدأ عدة بنى أيضاً ببناء محور ثالث يتعامد على المحورين السابقين لتكوين بنية ثلاثية الأبعاد. ويمكن لبعض الفترات أن تعمل على تشكيل المعمار المدولي الأولي للعضو أو الزائدة، مثل أجزاء الطرف.

5د– تُميز المداول الأولية المتشابهة بواسطة مواقعها على طول المحور شرق–غرب، وتنمو إلى حجم أو هيئة أو معمار مختلف عن المداول الأخرى.



6– نحت وزركشة وتلوين تفاصيل الأنماط في المداول
يُصقل عادة نظام الإحداثيات للمداول التشريحية إلى الدرجة التي تمكنه من التحديد الدقيق لمواقع صفوف أو مجموعة من الخلايا أو حتى خلايا مفردة. إن مهمة إضافة التفاصيل الدقيقة للشكل الحيواني بما في ذلك هيئة ولون وأماكن الخلايا المتخصصة –خلايا الاستشعار، والدفاع والتزيين، إلخ – تُوكل عادة إلى مجاميع صغيرة من الخلايا في البنى قد يصل عدد خلاياها إلى ملايين أو عشرات الملايين.

صغيرة أو ثديّي ضخم، يتكشف بوضوح بمجرد تمثيله بصرياً. ومشاهدة كل جين وهو ينهمك في رسم جغرافيا الجنين يساعدنا في تصوّر المراحل المعقدة على أنها نتاج مجموعة عمليات فردية أبسط؛ إن التعقيد في الحيوان يأتي من حدوث عدة عمليات في الوقت نفسه وبالتتابع خلال عملية النموّ. قد لا أستطيع وصف أو عرض تفاصيل عملية نموّ حيوان على المستوى الجيني في فصل واحد، ولست في حاجة إلى ذلك لتقديم صورة واضحة. كل ما أحتاج إليه هو كشف الخطوط العريضة في عملية النمو، وبالتركيز على الخطوات التي تبني المعالم الرئيسية للحيوانات سنرى بوضوح الكيفية التي تُصنع بها الأشكال الحيوانية. الصور الملوّنة التي توضح هذه الخطوات هي مجرد عيّنة من عشرات الآلاف من الصور التي جمعها الباحثون خلال العقدين المنصرمين، إنها المكافئ في علم الأجنة لصور الأقمار الصناعية للكرة الأرضية، وسأبدأ بجغرافيا ذبابة الفاكهة.

صناعة الذبابة

لا توفّر لنا الرؤية العادية أي شيء عن الأحداث الدراماتيكية الحاصلة داخل بيضة الذبابة الحديثة التكوّن. تبدأ جينات عدة الأدوات العمل بمجرد التخصيب على ترسيم الحدود الجغرافية في الجنين النامي، ورغم أن جميع الخلايا في الجنين النامي تحوي الدنا ذاته (والجينات ذاتها بطبيعة الحال)، إلا أن جينات عدة الأدوات تنشط في أجزاء محدّدة من الجنين وفي أوقات معينة خلال النموّ، ونستطيع رؤية أنماط تشغيلها وإيقافها بفضل تقنيات عالية تضيء الرنا أو منتجات البروتينات داخل

الجنين وأجزاء جسمه النامية، هذه الأنماط تكشف انتظام ومنطق صناعة الحيوان.

خطوط الطول، المحور شرق-غرب

يبلغ طول الجنين من الشرق إلى الغرب 100 خلية خلال بضع ساعات من التخصيب. ويُرسِّم عدد صغير من جينات عدة الأدوات حدودَ المناطق الشرقية والوسطى والغربية في الجنين باستخدام أربطة بعرض حوالي 15–25 خلية بعضها متداخل (اللوحة 4 أ).

هذه التقسيمات الداخلية عابرة، لكن قبل أن تتلاشى يُشغَّل صف آخر من جينات عدة الأدوات في مجموعات من سبعة أشرطة على الثلثين الشرقيين من الجنين. هذه الأشرطة بعرض 3–4 خلايا تفصل بينها أشرطة داخلية بعرض 4–5 خلايا (اللوحة 4 ب). يغطي كل شريط وشريط داخلي زوجاً من الفصوص المستقبلية؛ وقد أطلق على هذه المجموعة من جينات عدة الأدوات جينات «القاعدة-الزوجية» (pair-rule).

هذه الأشرطة عابرة أيضاً، وبمجرد أن تبدأ هذه الأشرطة المنتظمة الجميلة بالتلاشي تُشغَّل مجموعة أخرى من الجينات في أنماط مكوّنة من أربعة عشر خطاً، بعضها بعرض 1–2 خلية وبعضها الآخر أعرض قليلاً، على الثلثين الشرقيين من الجنين (اللوحة 4 ج). ستمتلك اليرقة المستقبلية أربعة عشر فصاً رئيسياً ولذلك فإن كل قطعة منتظمة من هذه الأنماط ستتحول إلى شريط واحد يصنع فصاً مستقبلياً واحداً. أغلب هذه الأنماط الأربعة عشر من الأشرطة تستمر خلال المراحل المتبقية

من عملية النموّ، وخلال ساعات قليلة من ظهورها يحدث التفصيص عياناً. بعض هذه الأشرطة ترسِّم الحدود بدقة بين الفصوص، فيما تعمل الأشرطة الأخرى على مجموعات مختلفة من خطوط الطول في وسط كل فص.

بعد أن تتضح المداول الفصية في الجنين بفضل هذه الصفوف من الجينات التي تعمل متعاقبة، تُفعّل مجموعة رابعة من الجينات للتمييز بين هويات المداول على خطوط طول مختلفة على امتداد المحور شرق-غرب. إنها جينات *Hox* التي يمتد نفوذها عموماً من فصين إلى حوالي سبعة فصوص، وتبقى أنماطها مستمرة طوال عملية النموّ (اللوحة 4 د)، وستقرر جينات *Hox* ما الذي يحدث وما الذي لن يحدث داخل أفراد أو مجموعات الفصوص.

خطوط العرض، المحور شمال -جنوب

في الوقت الذي يبدأ فيه المحور شرق-غرب بالانقسام إلى أجزاء، يشرع المحور شمال-جنوب في الانقسام إلى خطوط عرض بواسطة مجموعة مختلفة من جينات عدة الأدوات. وفي ما يشبه كثيراً المجموعة الأولى من جينات خطوط الطول يُرسّم الصف الأول من جينات خطوط العرض حدود مناطق الجنين الشمالية والاستوائية والجنوبية (اللوحة 4 هـ).

إن خطوط العرض في الجنين لا تؤول إلى مداول مكرّرة، لكن بعضها يرسم حدود طبقات الأنسجة المستقبلية في الحيوان. على سبيل المثال، الخلايا التي نشّطت الجين الموجود في اللوحة 4 هـ سينتهي

بها المطاف داخل الجنين خلال عملية تكوّن المُعيدة مشكلةً الطبقة الوسطى في الحيوان أو الأديم الأوسط الذي سيشكل الجهاز العضلي (musculature) والأنسجة الأخرى. شمال هذه الخلايا مباشرة توجد خلايا أخرى منشؤها قرب خط الاستواء سيتم سحبها جنوباً لتشكل البشرة على الجانب السفلي من الحيوان والحبل العصبي.

عوالم داخل عالم، جينات عدّة الأدوات ترسم مواقع الأعضاء والزوائد المستقبلية

بعد أن تُحَدَّد خطوط الطول والعرض وتشذّب؛ تكون المعلومات قد توافرت لتحديد المواقع على الجنين بالنسبة لهذين المحورين. بهذه الطريقة تؤسس أماكن الأعضاء والبنى المختلفة وبها أيضاً يتحدّد من أين تبدأ الجينات الحاكمة بناء العضو. وبناءً على العدد المطلوب تشكيله من أي نوع من الأبنية يرسم زوج واحد أو عدة أزواج من الإحداثيات موقع البناء.

على سبيل المثال، للذبابة ثلاثة أزواج من الأرجل في المنطقة الصدرية، زوج واحد في كل فص صدري. في جنين الذبابة النامي يُشَغَّلُ الجين الحاكم لبناء الطرف، جين *Dll* (راجع الفصل الثالث)، في عدة مواقع باتجاه النهاية الجنوبية للفصوص الثلاثة، وتحديداً غرب منتصف الجنين مباشرة (اللوحة 4 و، تحت). لاحظ أن جين *Dll* لا ينشّط في الفصوص الشرقية، لأن هذه المناطق من الفصوص تُدير أحداثها بروتينات *Hox* ويُمنع تنشيط *Dll* جهة الشرق (ستشكل هذه الجهة الفصوص البطنية ولن تحوي أية أرجل).

بالمثل أيضاً فإن الفراشة تمتلك زوجين مختلفين من الأجنحة، ونستطيع أن نرى أن الجينات الحاكمة الداخلة في بناء الجناح تتأهّب لتنشط في الخلايا الموجودة مباشرة شمال المنطقة التي علّمها جين *Dll* لترسيم مكان الأقدام في الفصين الصدريين الثاني والثالث، لكن ليس في أي مكان أبعد شرقاً (اللوحة 4 و، فوق). إن الموقع النسبي في الأجنحة النامية يعلن مسبقاً عن موقعها النسبي في الذبابة البالغة (الأجنحة في الأعلى والأرجل في الأسفل).

تكون الأرجل والأجنحة المستقبلية صغيرة في هذه المرحلة؛ يصل حجمها بين 15–20 خلية لكل عضو، لكنها ستنمو ألف مرة أو أكثر خلال بضعة أيام، وستصبح أكبر من الحجم الذي كان عليه الجنين لحظة انطلاقها منه. وستنظّم هذه البنى في النهاية جيداً في أجزاء منفصلة، ويعتمد هذا التنظيم على إرساء نظام من الإحداثيات داخل الجناح أو الرجل أو العضو النامي. يُنشّأ هذا النظام فيما لا يزال جزء الجسم صغيراً، عندما ترث الخلايا المعلومات حول موقعها في الفص، وتشذّب خلال عملية نمو البنية. على سبيل المثال، ينمو عنقود صغير من 20 خلية جناح إلى 50,000 خلية وترسّم الأجزاء الغربية (أمام) والشرقية (خلف) والشمالية (أعلى) والجنوبية (أسفل) بواسطة جينات عدّة الأدوات (اللوحة 4 ز). تعمل خطوط الطول والعرض داخل هذه البنى بمثابة حدود مادية (مثل حافّة الجناح) ونقاط مرجعية أو معالم رئيسية تنتظم حولها الانقسامات اللاحقة.

إن نظام الإحداثيات داخل زائدة نامية مشذبٌ ومصقولٌ كفاية لمنح صفٍ أو عنقود من الخلايا أو حتى بعض الخلايا المفردة مواقعها

وهويّاتها. على سبيل المثال، هناك سمتان واضحتان في جناح الذبابة هما مجموعات العروق التي تعمل بمثابة بنى داعمة خلال خفقات الجناح السريعة في عملية الطيران، وصفوف من هُلْب[1] (bristles) الاستشعار على الحافة الأمامية في الجناح. تُرسّم مواقع هذه العروق والمساحات فيما بينها بواسطة جينات عدّة الأدوات قبل فترة طويلة من تشكل العروق الفعلي، حوالي أسبوع قبل شروع الحشرة في الطيران. وتتشكل صفوف الهلب في حافة الجناح الأمامية ويتحدّد موقعها بالنسبة للمحورين الرئيسيين للجناح بحيث تنمو على جانبي خط الاستواء، لكن ليس في النصف الشرقي من الجناح. وتُفعّل الجينات البانية لهذه الهلب في هذه المواقع قبل ظهورها للعيان بفترة طويلة (اللوحة 4 ح).

تمايز المداول المكرّرة تسلسلياً

يختلف زوجا الأجنحة في الذبابة اختلافاً كبيراً في الشكل والوظيفة. الجناحان الأماميان كبيران ومسطحان، ومعرّقان، ومهيّآن لتوفير القدرة على الطيران. أما الجناحان الخلفيان فأصغر بكثير وشكلهما يشبه البالون وبلا عروق ويعملان على موازنة الذبابة في أثناء الطيران عبر استشعار وتصحيح زوايا الانعراج والانحدار والالتفاف (الذباب من دون الأجنحة الخلفية يصطدم بالأرض). يبدأ الجناح الخلفي بالنموّ شبيهاً بالجناح الأمامي؛ فنظاما الإحداثيات -اللذان يظهران على هيئة أنماط للنشاط الجيني -لهذين النوعين المختلفين من الأجنحة متطابقان

(1) شعيرات صلبة ومستقيمة كالمسامير على حافة الجناح، وفي لسان العرب، مادة (هلب): «الهُلْبُ أيضا الشعر النابت على أجفان العينين ...... واحدته هُلْبة».

(اللوحة 4 ط)، لكن الجناح الخلفي يؤول إلى حجم وشكل ونمط مختلف جداً عن الجناح الأمامي.

إن اللاعب الرئيسي في جعل هذين الجناحين مختلفين، وهما ينموان في فصين متجاورين (على خطوط طول مختلفة)، هو جين *Hox* يعرف باسم *ألترابيثوراكس (Ultrabithorax)* أو اختصاراً *(Ubx)*. يُفعّل جين *Hox* في جميع خلايا الجناح الخلفي لكن ليس في أي خلية من خلايا الجناح الأمامي (اللوحة ي). إن مهمة جين *Ubx* هي تعديل برنامج النموّ داخل الجناح الخلفي بحيث تُكبت بعض جينات تنميط الجناح فيما تستخدم جينات أخرى بطرق فريدة. على سبيل المثال، لا تفعّل جينات بناء العروق في الجناح الخلفي، ولا جينات الهلب في الحافة الأمامية منه أيضاً. إن تمايز الجناح الخلفي عن الجناح الأمامي باستخدام جين *Ubx* يوضح كيف يتم التحكّم في خاصية أساسية في تصميم الحيوان- وهي تمايز الأجزاء المكررة تسلسلياً- من خلال جينات *Hox* على خطوط طول معينة على طول محاور الجسم الرئيسية. المبدأ ذاته الذي شاهدناه لتوّنا في الذبابة ينطبق أيضاً على بناء وتنفيذ مخطط أجسامنا وأجزائها المختلفة.

صناعة الفقاريات

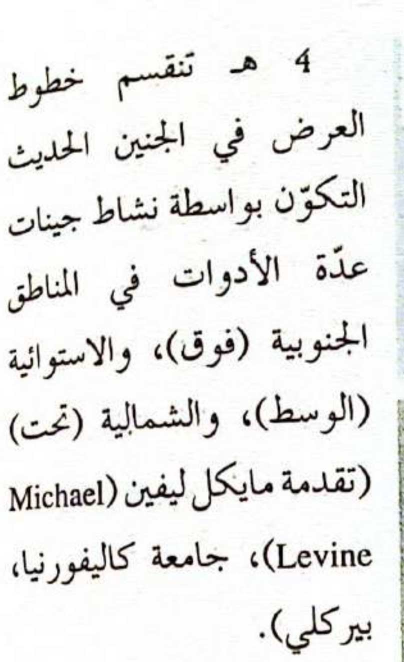
بالرغم من أن بيوض الفقاريات تتفاوت كثيراً من حيث الحجم والسمات، بدءاً ببيوض الثدييات الصغيرة وحتى البيوض الضخمة المغطاة بالقشرة للطيور الكبيرة والزواحف، كما تتفاوت أشكالها الحيوانية البالغة أيضاً من أسماك الجوبي (guppies) المخصّصة للزينة إلى

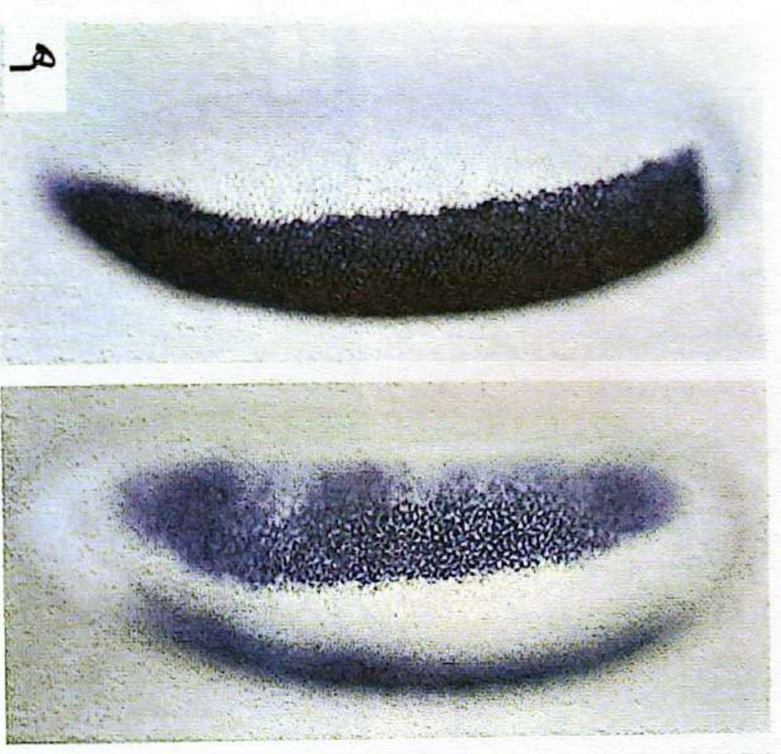
4 أ ترسّم المناطق الغربية والوسطى في جنين الذبابة الحديث التكوّن بواسطة نشاط بروتينين من بروتينات عدة الأدوات (بالأخضر والأحمر فيما يظهر تداخلهما باللون الأصفر). كل دائرة ملونة عبارة عن نواة خلية واحدة.

4 ب ثم ينقسم الجنين إلى فترات من فصوص مزدوجة بواسطة مجموعة من بروتينات عدّة الأدوات تنشط في شريط واحد لكل فصين مستقبليين.

4 ج ينقسم الجنين بعد ذلك إلى فترات فصية، وبروتين عدة الأدوات هنا يرسّم الجزء الخلفي من كل فص مستقبلي. (اللوحات 4 (أ–ج) تقدمة جيم لانجلاند (Jim Langeland) وستيف بادوك (Steve Paddock)).

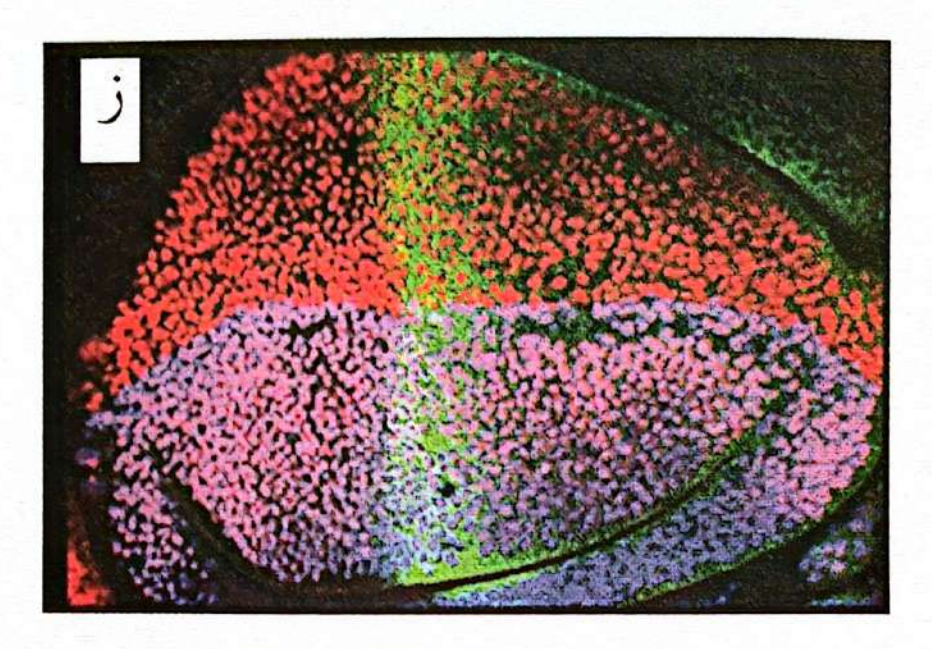
4 د تنشّط مناطق نشاط بروتينات *Hox* في خطوط طول مختلفة، والصورة توضح أربعة بروتينات *Hox* في أربعة ألوان مختلفة. (تقدمة نيبام باتل (Nipam Patel)، جامعة كاليفورنيا، بيركلي).

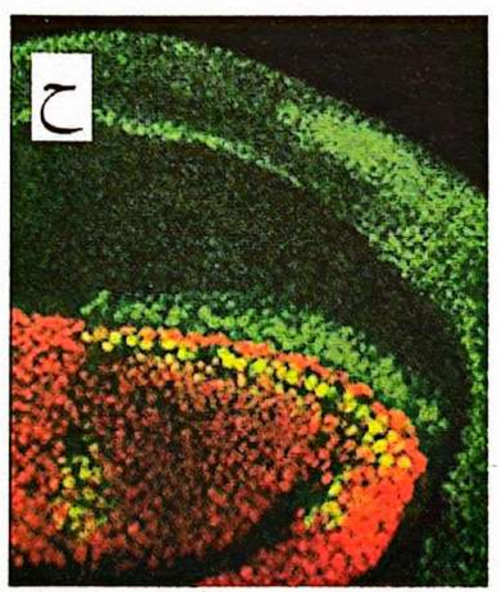

4 هـ تنقسم خطوط العرض في الجنين الحديث التكوّن بواسطة نشاط جينات عدّة الأدوات في المناطق الجنوبية (فوق)، والاستوائية (الوسط)، والشمالية (تحت) (تقدمة مايكل ليفين (Michael Levine)، جامعة كاليفورنيا، بيركلي).





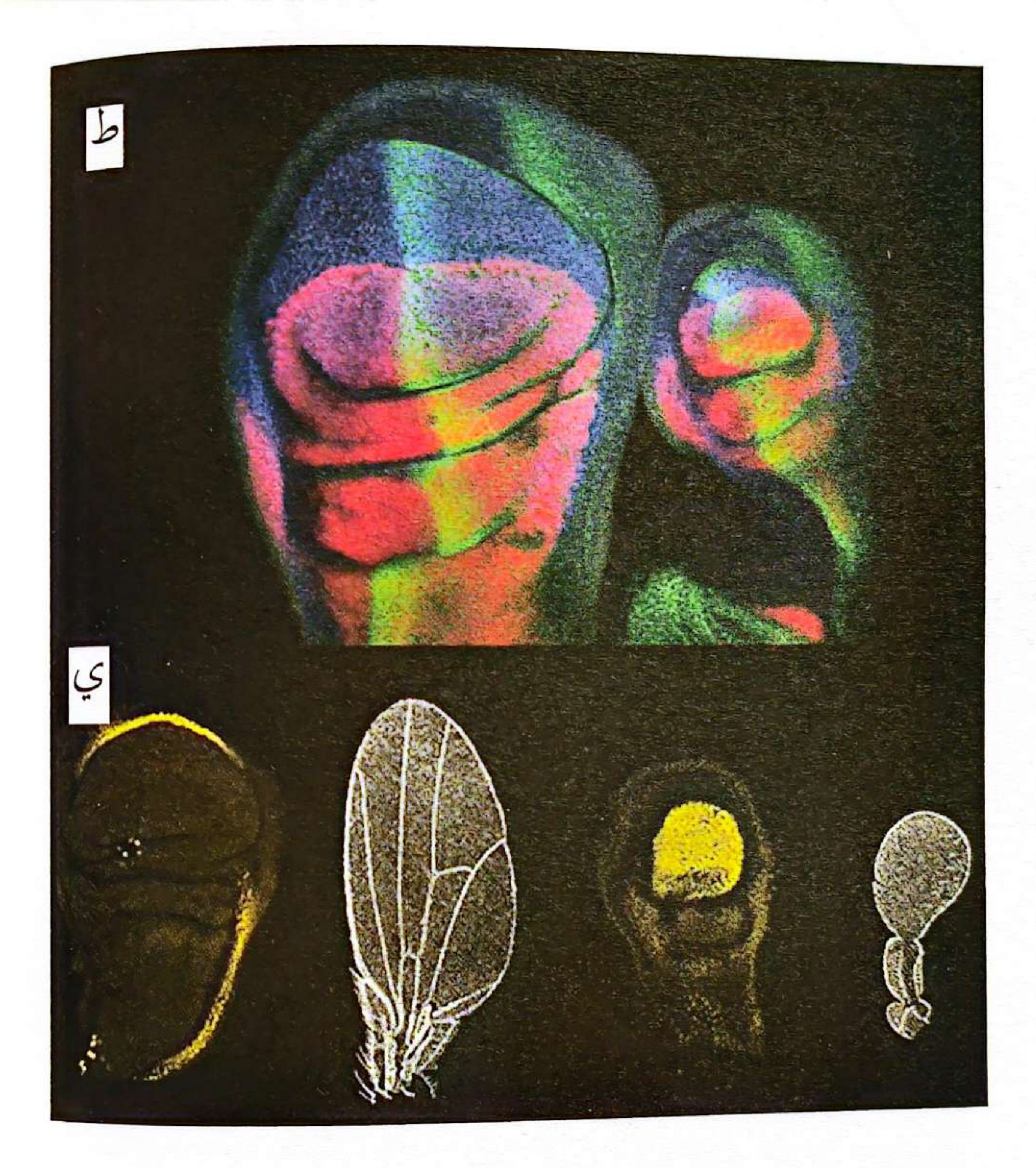
4 و ترسّم المواقع المستقبلية للزوائد بواسطة نشاط بروتين من عدة الأدوات على تقاطعات محدّدة من خطوط الطول والعرض. موقع الجناح الأمامي المستقبلي (w) وموقع الجناح الخلفي (h) والأقدام (I) مرسّم بواسطة بروتينين مختلفين. (سكوت ويذربي (Scott Weatherbee)





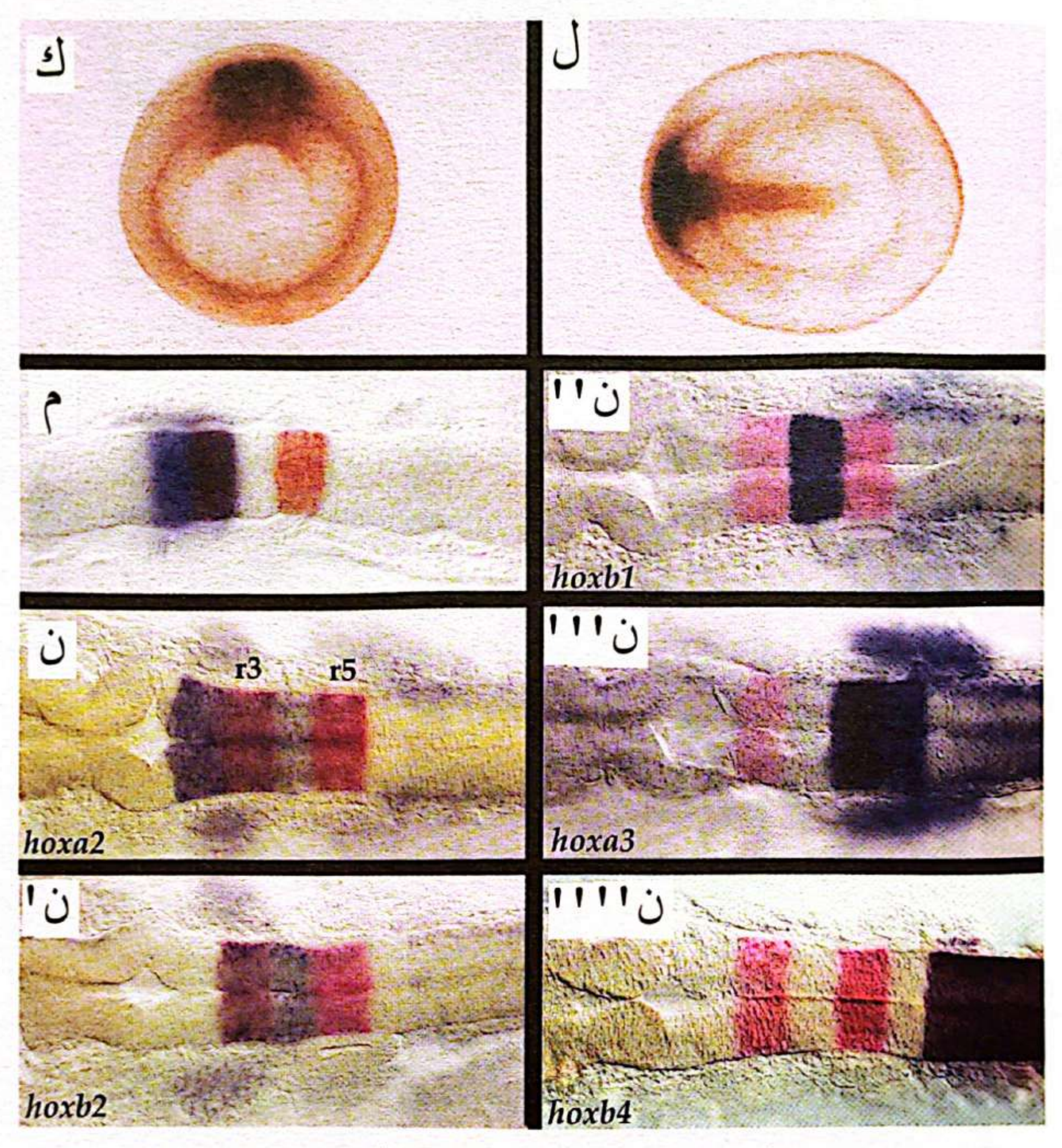
4 ز ينقسم الجناح النامي بواسطة بروتينات مختلفة من عدّة الأدوات إلى أسطح مستقبلية: علوية (الأحمر) وسفلية (الأرجواني)، وأقسام: خلفية (اليسار) وأمامية (الأصفر وجهة اليمين)، كل دائرة ملوّنة هي نواة خلية جناح. (جيم ويليامز وستيف بادوك (Jim Williams And Steve Paddock))

4 ح تُفعّل بروتينات عدة الأدوات التي تُنشّئ بنى معينة على إحداثيات محددة في الجناح، ويظهر في الصورة بروتين عدة الأدوات الذي سيبدأ عملية تكوين هلب الاستشعار على طول الحافة المستقبلية للجناح (الواقعة عند نهاية المنطقة الحمراء) (سيث بلير (Seth Blair)، جامعة وسكُنسن).



4 ط رغم اختلاف الجناحين الأمامي والخلفي في الحجم إلا أنهما ينقسمان إلى مناطق بواسطة بروتينات عدّة الأدوات ذاتها (قارن بين أنماط الأحمر والبنفسجي والأخضر/الأصفر بين الجناحين) (جيم وليامز وستيف بادوك).

4 ي يمايز بروتينُ *Hox* الجناحَ الخلفي (أقصى اليمين) عن الجناح الأمامي (الثاني من اليسار). سينتج الجناح عن القرص الكبير في أقصى اليسار، ولن تقوم أي خلية من خلايا الجناح المستقبلي بتنشيط الألترابيثوراكس (باللون الأصفر). وجميع الخلايا التي ستكون الجناح الخلفي (الأصفر الكثيف في القرص في الشكل الثاني من اليمين) ستنشط بروتين *Hox* (سكوت ويذربي).

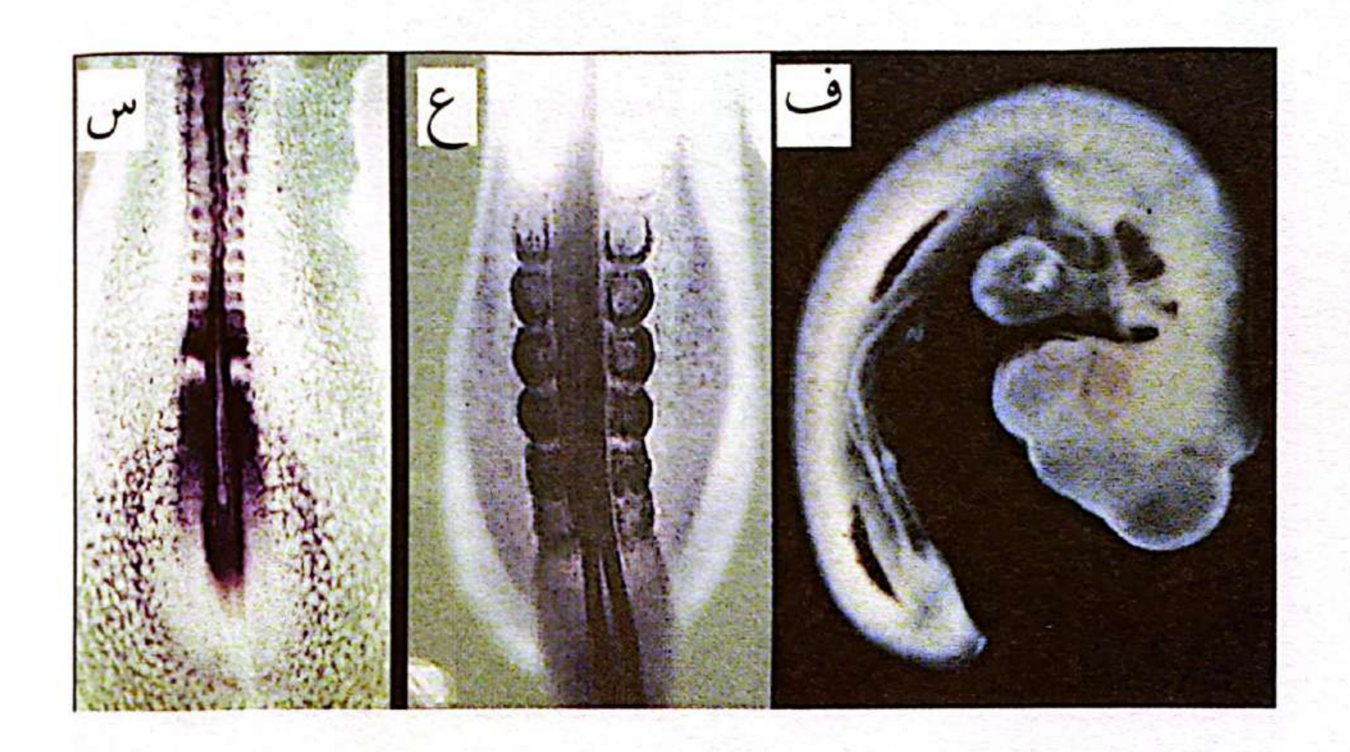


4 ك يُصنع بروتين عدة الأدوات كوردن (Chordin) في خلايا المعضّي في جنين الضفدع. (الصورة تقدمة إدي دي روبرتس (Eddy De Robertis)، جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس).

4 ل يصنع بروتين عدة الأدوات Frzb في الخلايا باتجاه منطقة الرأس في جنين الضفدع. (الصورة تقدمة إدي دي روبرتس، جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس).

4 م ترسم جينات عدّة الأدوات الانقسامات المستقبلية للدماغ الخلفي في الفقاريات، تظهر في الصورة ثلاثة جينات (بالأزرق والأسود والبرتقالي) يرسم نشاطها القسيمات المعينية ق2 وق3 وق5. (الصورة تقدمة سسيليا موينس (Cecilia Moens))، معهد هوارد هيوز الطبي، مركز فريد هاتشينسون لأبحاث السرطان، سياتل).

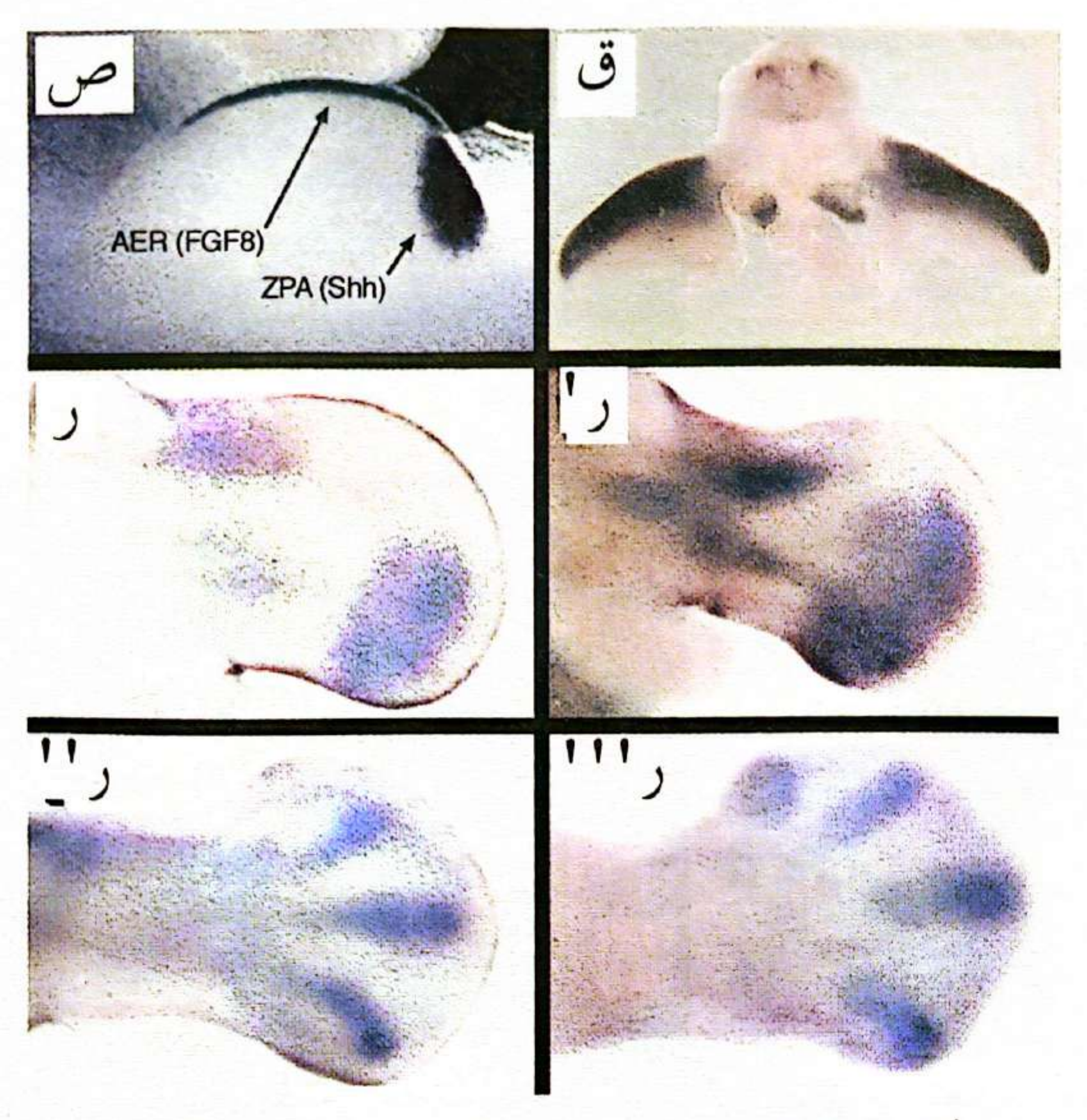
4 ن مناطق نشاط جينات Hox في الدماغ الخلفي في الفقاريات، في كل صورة يرسم ق3 وق5 بالوردي/ البرتقالي بواسطة جين عدة الأدوات *Krox 20*. وتظهر بالبنفسجي خمسة نشاطات مختلفة لجينات Hox في الدماغ الخلفي ولها حدود مختلفة من ق2 (*Hoxa2*) إلى ق7 (*Hoxb4*). (الصورة تقدمة سسيليا موينس، معهد هوارد هيوز الطبي، مركز فريد هاتشينسون لأبحاث السرطان، سياتل).



4 س تُرسّم الجسيدات بواسطة نشاط جين عدة أدوات واحد في كل جُسيدة نامية بما في ذلك تلك التي لم تتشكل بعد. (الصورة تقدمة أوليفيه بوركي (Olivier Pourquie)، معهد ستاورز، مدينة كانساس، ميسوري).

4 ع تتنشط مناطق Hox في جُسيدات محددة على طول جذع الجسم. (الصورة تقدمة أوليفيه بوركي، معهد ستاورز، مدينة كانساس، ميسوري. أعيدت طباعته من كتاب *Cell* 106 (2001): 219–32، بإذن من الناشر إلسيفيَر).

4 ف نشاط جين عدة الأدوات الذي يرسم موقع الجناح النامي وبراعم الرجل. (الصورة تقدمة جون فالون (John Fallon)، جامعة وسكُنسن.



4 ص تُرسّم منطقتان رئيسيتان في برعم طرف الدجاجة بواسطة نشاط جينات عدة الأدوات، حيث ينشط جين *القنفذ* الصوتي في منطقة النشاط الاستقطابي (ZPA)، وجين *FGF8* على قمة برعم الطرف. (الصورة تقدمة كليف تابين (Cliff Tabin)، كلية هارفارد الطبية، كامبريدج، ماساشوستس)

4 ق يُرسّم جين عدة الأدوات *Lmx* النصف العلوي من الطرف المستقبلي، ويظهر برعما طرفين في الصورة، لاحظ اللون البنفسجي في النصف العلوي في كل منهما. (الصورة تقدمة كليف تابين، كلية هارفارد الطبية، كامبريدج، ماساشوستس).

4 ر تقدم نموّ الطرف وتكوين الغضروف يتكشف بواسطة نشاط جين عدة أدوات، في الصورة الأولى يرسم نشاط الجين *Sox9* تكوين الطرف العلوي في قاعدة البرعم. تكشف بقية الصور التحديد المتدرج للساعد واليد والأصابع. (الصورة تقدمة د. خوان هيرلر، جامعة كانتابريا، سانتاندر، إسبانيا، أعيدت طباعته من كتاب ***Developmental Biology*** 257 (2003): 292–301، بإذن من الناشر إلسيفيَر).

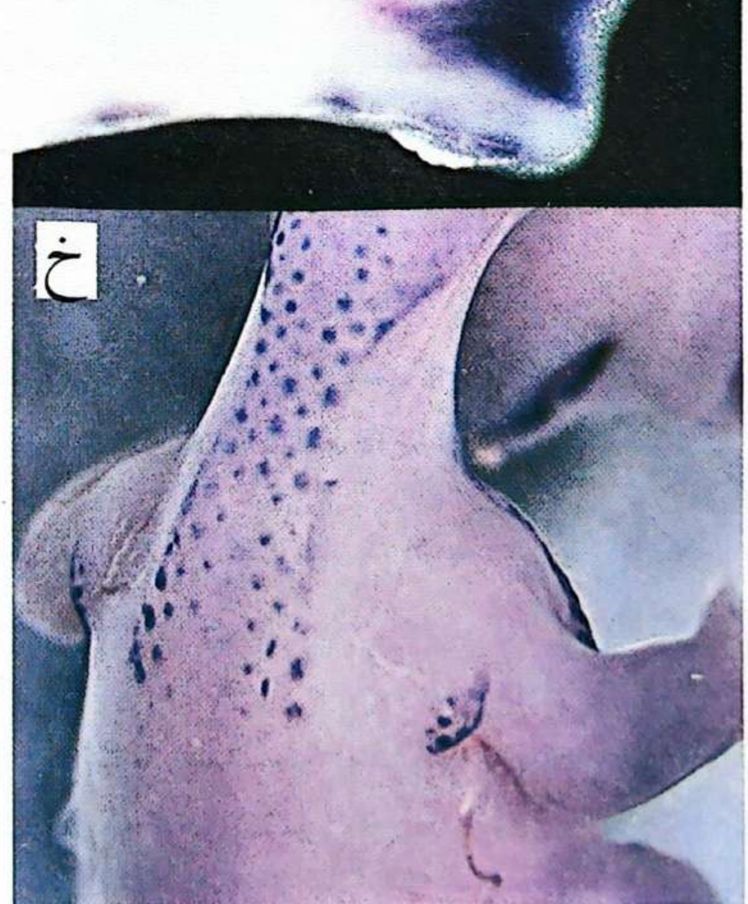


4 ش يرسم جين عدة الأدوات *GDF5* المفاصل المستقبلية في الأصابع، (الصورة تقدمة د. خوان هيرلر، جامعة كانتابريا، سانتاندر، إسبانيا، أعيدت طباعته من كتاب *Developmental Biology* 257 (2003): 292–301، بإذن من الناشر إلسيفيَر)



4 ت يرسم جين عدة الأدوات سكليراكسس *(scleraxis)* الأوتار المستقبلية للطرف والأصابع. (الصورة تقدمة كليف تابين، كلية هارفارد الطبية، كامبريدج، ماساشوستس).

4 ث يرسم جين عدة الأدوات *BMP4* النسيج الذي سيموت بين الأصابع. الصورة تقدمة كليف تابين، كلية هارفارد الطبية، كامبريدج، ماساشوستس).



4 خ يرسم جين عدة الأدوات باتشد *(patched)* المواقع المستقبلية لبراعم الريش النامي على طول ظهر الدجاجة النامية. الصورة تقدمة كليف تابين، كلية هارفارد الطبية، كامبريدج، ماساشوستس).

الفيلة والديناصورات، إلا أن جميع أجنة الفقاريات تمرّ بمرحلة خلال النموّ تبدو فيها متشابهة نوعاً ما. يحدث هذا عندما يتشكل المحور الرئيسي شرق-غرب (رأس-ذيل)، وتحدّد طبقات الأنسجة المختلفة (شمال-جنوب) جيداً بحيث تتضح معالم الأنبوب العصبي والحبل الظهري (قضيب صلب من الخلايا يوجد على طول الظهر في جميع الفقاريات)، وتكوّن النتوءات الزوجية المنتظمة للجسيدات نمطاً من المداول المتكرّرة على أغلب امتداد الاتجاه الطولي للحيوان.

سأركز أولاً على الخطوات التي تقود إلى تشكيل هذه المرحلة المشتركة بين الفقاريات بُغيةَ إيضاح عملية تشكيل وتنفيذ التصميم الأساسي لمخطط بناء الجسم الفقاري. هذه الخطوات تتضمن تأسيس المحور الرئيسي للجسم، وانقسام الدماغ إلى عدة مناطق، وتشكيل الجُسيدات التي ستكوّن الفقرات والضلوع وبقية المداول الرئيسية الأخرى للمحور الرئيسي للجسم. ثم سأتعمق في عملية نموّ الأطراف لإيضاح كيفية نحت الأنماط المتعددة التفاصيل. وسأعرّج على مجموعة من الدراسات حول الضفادع والأسماك والفئران والدجاج لرسم الصورة العامة. إن المبادئ والقواعد العامة هي ذاتها في كل نوع، إلا أن بعض الأحداث تفهم أكثر أو تسهل مشاهدتها في أنواع معينة من الحيوانات. الأمر المهم هو استيعاب الصورة الكلية لبناء وتنفيذ مخطط الجسم الفقاري، ولن نولي الاختلافات في التفاصيل كثير اهتمام.

تشكيل المحور وتكوين طبقات الأنسجة

إن الكثير مما نعرفه عن تشكيل المحور وتكوين الطبقات الأولية الثلاث في الفقاريات اكتُشف للمرة الأولى في الضفادع. فالبرمائيات عموماً تضع بيوضاً ضخمة وبأعداد كبيرة مما يجعل إجراء التجارب عليها أسهل بكثير من بيوض الثدييات الصغيرة التي تنتجَ بكميات أقل، وتنمو داخل الأم. وبينما تصل جميع أجنّة الفقاريات إلى تعضٍ متشابه بعد تكوّن المُعيدة، إلا أنها تصل بطرق متغايرة قليلاً وذلك بسبب اختلاف النسبة بين الخلايا وصفار البيضة في الجنين الحديث التكوّن. ورغم أن الخطوات الأولى في بناء جنين الضفدع لا تبدو مثل خطوات جنين الفأر، إلا أن مجموعة جينات عدّة الأدوات التي تُعضّي المحاور وطبقات الأنسجة متشابهة عموماً.

تتعضّى المحاور وطبقات الأنسجة في أجنة الفقاريات بواسطة سلسلة من الأحداث التحريضية (inductive) حيث يحرّض إنتاج جزيء إنتاج جزيئات أخرى، وهكذا دواليك. فتكوين المحور شرق-غرب يتبع تكوين المحور شمال-جنوب. ويعتبر البروتين كوردن (Chordin) أحد أبرز اللاعبين العديدين في إنشاء هذا المحور، فهو من بروتينات عُدة الأدوات وتنتجه خلايا محيطة بالشفة الظهرية لمسمّ الأريمة (اللوحة 4 ك). وهي المنطقة التي أظهر سبيمان وتلميذه هايلد مانجولد (Hilde Mangold) قدرتها على تعضية المحور شمال-جنوب. فيما تقوم بروتينات أخرى بتعضية المحور رأس-ذيل مثل البروتين فرزب (Frzb) الذي يُنشّط في الخلايا قرب الرأس المستقبلي للجنين (اللوحة 4 ل).

انقسامات الدماغ

يعتبر الأنبوب العصبي من أوائل المناطق الواضحة تشكلاً في الجنين. ويعمل هذا الأنبوب على إنتاج الدماغ والنخاع الشوكي المستقبليين، وسينقسم الدماغ إلى ثلاث مناطق رئيسية (الدماغ الأمامي والدماغ الأوسط والدماغ الخلفي)، وستواصل هذه المناطق انقساماتها إلى أجزاء متخصّصة في وظائف مختلفة تتراوح بين الشم والرؤية إلى الأنشطة اللاإرادية مثل التنفّس ونبض القلب. قبل أن تصبح هذه التقسيمات ظاهرة، وقبل اكتسابها وظائفها، وقبل تكامل هذه الوظائف بفترة طويلة، ترسِّم جيناتُ عدّة الأدوات المناطقَ التي ستمثل أجزاء الدماغ المستقبلية داخل الأنبوب العصبي. يعمل أحد جينات عدّة الأدوات مثلاً على ترسيم الدماغ الأمامي والأوسط المستقبليين بينما يعمل جين آخر على ترسيم الدماغ الخلفي والحدود الفاصلة بينه وبين الدماغ الأوسط. ويتشكّل المخيخ شرق هذه الحدود مباشرة.

تُفعّل جينات أخرى من عدّة الأدوات في أشرطة تحدّد المواقع والحدود المستقبلية للقُسيمات المعيّنية (rhombomeres)، الأجزاء السبعة للدماغ الخلفي في الفقاريات. تربط بعض الأشرطة القُسيمات المعيّنية المتجاورة وبعضها الآخر يرسّم أزواجاً متناوبة من القُسيمات (اللوحة 4 م). وتُرسّم المداول المختلفة للدماغ الخلفي بواسطة النشاط المتداخل لجينات *Hox*. تذكر أن جينات *Hox* تقع في أربعة عناقيد في أغلب الفقاريات، يرمز لهذه العناقيد بالحروف (أبجد) وللجينات في هذه العناقيد بالأرقام (1–13)، وفي الدماغ الخلفي تُرسّم مجموعات القُسيمات المعيّنية الفردية والمتداخلة بواسطة نشاط جينات نحت

Hox. تظهر هذه العناصر الخمسة في اللوحة (4 ن)، وهي جين *Hoxa2* الذي ينشّط في القسيمات المعيّنية (ق) ق2–ق4، وجين *Hoxb2* ينشط في القسيمين ق3–ق4، و*Hoxb1* في ق4، و*Hoxb3* في ق5 وق6، فيما ينشط *Hoxb4* في ق7 والمناطق الأبعد باتجاه الشرق في النخاع الشوكي. إن هذه الجينات الخمسة كافية لتوفير «شفرة» نحت فريدة لكل قسيم معيّني من ق2 إلى ق7، وهناك جينات أخرى تمايز ق1 (المخيخ المستقبلي) عن بقية القُسيمات المعيّنية. إن منطق صناعة سلاسل من المداول المتشابهة أولاً ثم جعلها مختلفة بعضها عن بعض لاحقاً يسري أيضاً على خاصية أخرى مميزة للفقاريات وهي بناء وتمايز التعضّيات الفصّية لمخطط الجسم.

تفصيص الجنين الفقاري، جُسيْدة في كل مرة

الجُسيدات هي لبنات البناء في الأجسام الفقارية. فهي تنشئ الأجزاء المدولية في العمود الفقري والأضلاع الملتصقة بها والمجموعات العضلية. إنها تظهر في الجنين على هيئة أزواج من الانتفاخات الفصية المتباعدة فيما بينها بالتساوي على طول المحور الرئيسي للجسم. وتتشكّل هذه الجسيدات تباعاً الواحدة تلو الأخرى بمعدل منتظم من الرأس باتجاه الذيل (من الغرب إلى الشرق) وينطبق ذلك على جميع الفقاريات، إذ تنمو جُسيدة واحدة كل عشرين دقيقة في جنين سمكة الزرد (zebra fish)، وكل ساعة ونصف في جنين الدجاجة، وكل ساعتين في جنين الفأر. ويتفاوت عددها بين الفقاريات، فتتشكل عند الإنسان حوالي 42 جسيدة، والفأر 65، ويصل عددها عند الثعبان إلى بضع مئات من الجسيدات.

يستدلّ على هذه الدقة الشديدة والتعاقب من الرأس إلى الذيل في تشكيل الجسيدات من خلال نشاط عِدة جينات من عُدّة الأدوات. تنشط حفنة من الجينات في الجزء غير المفصص من الجنين قبل تشكّل الجسيدات ويتذبذب نشاطها ارتفاعاً وانخفاضاً خلال كل دورة إنتاج جُسيدة. في الأمام تظهر أشرطة منفصلة من نشاط عدة الأدوات مهمتها ترسيم حدود الجسيدة المتكوّنة حديثاً فيما تظهر أبعد باتجاه الرأس أشرطة ثابتة تعمل على ترسيم حدود الجسيدات المتكونة سابقاً. إن الصور الملتقطة لنشاط عدة الأدوات الجينية خلال نموّ الجنين تكشف التقدم التدرّجي في تكون الجسيدة (اللوحة 4 س).

تبدأ الجُسيدات متطابقة في الشكل لكنها تنشئ أنواعاً مختلفة من الفقرات والأضلاع والعضلات تبعاً لموقعها على طول المحور رأس-ذيل. يستدلّ على هذه الهويّات المتباينة والمصائر المختلفة للجُسيدات من خلال أنماط نشاط جينات *Hox* على طول المحور الرئيسي للجسم (من الغرب إلى الشرق). فعلى مستوى جُسيدات معينة تشغّل جينات *Hox* لإنشاء حدود غربية (أمامية) واضحة لكن نشاطها يتناقص باتجاه المناطق الشرقية (الخلفية) (اللوحة 4 ع).

إن هذه الحدود المتداخلة لنشاط جينات *Hox* تؤدي إلى إنتاج توليفاتٍ فريدة من جينات *Hox* تنشط في جُسيدات مختلفة. علاوة على ذلك فإن الحدود الأمامية الحادة لنطاقات *Hox* المختلفة تُرسِّم عادةً الحدود بين مختلف أنواع البنى في الهيكل الفقاري. على سبيل المثال، ترسّم حدود نشاط الجين *Hoxc6* الحدود بين الفقرات العنقية والصدرية في جميع الفقاريات.

صناعة الطرف: عظمة الساق موصلة بـ...

بعد أن يتضح مخطط الجسم الأساسي وتبين معالمه، وتقطع الأنماط المتكررة للجسيدات شوطاً في النموّ، يبدأ في الجنين ترسيم مواقع مختلف الأعضاء والزوائد التي ستتكون لاحقاً، وتفعّل جينات عدّة الأدوات لإنشاء بنى ثلاثية الأبعاد، وهكذا يبدأ تشييد أجزاء الجسم.

تمتلك الفئران وسائر الفقاريات عدة أعضاء مثلنا تماماً، سأركز هنا على الأطراف فقط؛ إن نمط الأربعة أطراف يعود لأزمنة غابرة، وهناك العديد من التشابهات العامة في نموّ الطرف بين جميع الفقاريات. ولقد حظي كلٌ من الفأر والدجاجة بدراسات موسّعة، ولذلك سأعتمد عليهما أساساً في رسم صورةٍ عن الكيفية التي تبنى بها هذه القطع التشريحية المذهلة.

تبدأ الأطرافُ بالنموّ على هيئة براعم صغيرة تكبر خارجة من مجنبة الجنين، وكل برعم يتحدد بنقطتي إحداثيات توجد على امتداد المحور شرق-غرب. تنشأ الأطراف الأمامية عند أعداد مختلفة من الجسيدات في الفقاريات المختلفة لكنها توجد دائماً عند الحدود العنقية/ الصدرية. سيصبح البرعم الغربي الطرفَ الأمامي (رِجْل في الفئران وجناح في الدجاج)، والبرعم الشرقي سيكون الطرف الخلفي (رجل في النوعين). ونستطيع في مرحلة مبكرة جداً رؤية جين عدّة أدوات واحد يرسِّم نشاطهُ مواقعَ الوسائد الصغيرة لأنسجة الطرف وهي في بدء التشكل (اللوحة 4 ف).

إن البراعم رغم أنها بالغة الصغر بدايةً إلا أنها ثلاثية الأبعاد، لها ثلاثة محاور تمتد من الأعلى (الخلف) إلى الأسفل (راحة اليد) ومن

الأمام (الإبهام) إلى الخلف (الخنصر) ومن الأجزاء الدانية (كالكتف) إلى الأجزاء القاصية (الأصابع) التي ستتشكل جميعاً في أثناء نموّ البرعم الدراماتيكي. هناك جينات محدّدة من عدّة الأدوات تعضي هذه المحاور في برعم الطرف الناشئ. على سبيل المثال يصنع جزيء التأشير القنفذ الصوتي في الجزء الخلفي الأقصى من البرعم (اللوحة 4 ص)، ويصنع بروتين التأشير FGF8 حول جميع أجزاء القمة الخارجية لبرعم الطرف (اللوحة 4 ص)، بينما ينشط الجين *Lmx* في الخلايا الموجودة في النصف العلوي من الطرف فقط (اللوحة 4 ق).

تُفعَّل جينات أخرى من عدّة الأدوات في أنماط تشي بالنمو العياني للعظام الطويلة والأصابع والمفاصل والعضلات والأوتار الموجودة في الطرف المكتمل، ويتقدّم نموّ هذه الأجزاء في اتجاه ينطلق من الداني إلى القاصي حاملة الموقع المستقبلي للعضد أو الفخذ، وللساعد أو الساق، ولليد أو القدم في ترتيب متسلسل. يتشكل العظم من خلال تكاثفات خلايا تتجمع بداية لتكوين قالب غضروفي ثم يُستبدل بالعظم. يبدأ تنميط الطرف أولاً على هيئة أنماط غضروفية، لكن حتى قبل أن تتضح هذه الأنماط على المستوى الخلوي يبدأ نشاط جين عدة الأدوات *Sox9* بالتشكيل الأولي لأنماط التكاثفات العظمية (اللوحة 4 ر). وتنشأ المفاصل في مناطق بين هذه التكاثفات وحتى قبل أن تصبح هذه المساحات واضحة على المستوى الخلوي ترسم أشرطة من نشاط الجين *GDF5* المواقع المستقبلية للكتف والمرفق والرسغ والمفاصل بين راحة اليد وعظام الأصابع في الطرف الأمامي، ومواقع الركبة والكاحل والقدم ومفاصل أصابع القدم في الطرف الخلفي (اللوحة 4 ت). أما المواقع

المستقبلية للأربطة التي تصل العضلات بعظام الطرف فتشكيلها المبدئي يعود لنشاط الجين *سكليراكسس* (scleraxis)؛ وهو أحد جينات عدّة الأدوات (اللوحة 4 ت).

يشارك الموت أيضاً في نحت جمال الأطراف. فانفصال الأصابع في الفئران والدجاج والبشر يحدث بسبب موت الأنسجة بين الأصابع في الطرف النامي. تُرسم هذه المناطق بين الأصابع، في اليد أو القدم الشبيهة بالوسادة في هذه المرحلة، بواسطة نشاط جينات أخرى من عدة الأدوات تعطي تعليماتٍ لخلايا هذه المناطق بتنفيذ عملية موت مبرمج للخلايا (اللوحة 4 ث)، وبأسلوب يذكرنا بقوالب تقطيع البسكويت تُزال الأنسجة بين الأصابع وتبقى الأصابع. والمثير للاهتمام أنه يوجد في البط جين إضافي من عدّة الأدوات ينشط في المنطقة بين الأصابع ويمنع الإشارة المحفزة للموت، وهذا ما يترك الوتَر بين الأصابع في أقدام البط سليماً.

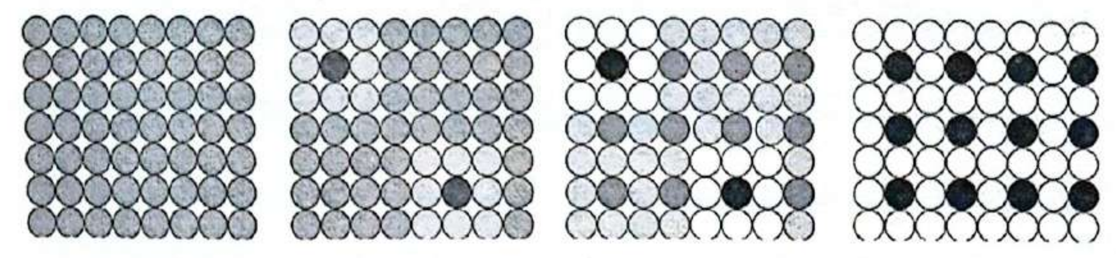
بالرغم من أن جميع الأطراف تتركب من البنى ذاتها -العظام والأوتار والعضلات والمفاصل، إلخ -إلا أن هذه البنى تختلف في الحجم والشكل والعدد داخل الطرف الواحد. على سبيل المثال، يتكوّن العضد من عظمة واحدة طويلة، والساعد يحوي عظمتين طويلتين، واليد فيها خمس أصابع. إن حجم وشكل وعدد أجزاء الطرف تتأثر بمجموعة من جينات *Hox* (*Hoxa9-13* و*Hoxd9-13*) التي تنشط في أنماط معقّدة ومتداخلة جزئياً خلال عملية نمو الطرفين الأمامي والخلفي. يُبنى الطرفان الأمامي والخلفي بطرق مختلفة في أغلب الأنواع. فسواعدنا مقارنة بسيقاننا، وأيدينا مقارنة بأقدامنا، وأصابع اليد مقارنة

بأصابع القدم أشكال مختلفة للبنى ذاتها. وفي الحيوانات الأخرى، مثل الطيور أو الكناغر أو التيرانوصور، تكون الاختلافات بين الأطراف الأمامية والخلفية أكثر دراماتيكية. إن هناك مجموعة من جينات عدّة الأدوات تُنشّطُ بانتقائية سواء في الطرف الأمامي أو الخلفي وتتحكم في الاختلافات بين هذه الزوائد المتناددة تسلسلياً.

اللمسات الأخيرة: النظام في المستويات الدقيقة

إن إحدى الحقائق المهمة حول أنماط جسم الحيوان هي الانتظام في جميع المستويات، بدءاً بمخطط الجسد العام إلى التفاصيل الدقيقة للبنى المفردة أو أجزاء الجسم. وتعتبر الحراشف التي تصطف كبلاطات على جناح الفراشة والتباعدات المتساوية للريش في جناح طائر أمثلة جيدة على هذه التفاصيل الدقيقة التي نتحدث عنها. ورغم أنه يمكن تحديد مواقع الخلايا بدقة كافية إلا أنها ليست الطريقة الوحيدة لتحقيق الانتظام في الأنماط، إذ يتم تحقيق التباعد بين العديد من الأجزاء المنضدة في صفوف كثيرة عادة من خلال عملية تُعرف «بالتثبيط الجانبي» (lateral inhibition) وهو مبدأ بسيط لكنه مدهش التأثير.

تخيل لفيفاً من الناس يتزاحمون في بقعة معينة، ثم تلقّى كل شخص منهم تعليمات بأن يبتعد عن البقية بمقدار ذراع في كل اتجاه، ونتيجة لذلك صنع كل شخص حوله منطقة حظر بمقدار ذراع يمنع فيها الآخرين من الدخول في منطقته. سيكون لدينا بالتالي صفوف من الأفراد المتباعدين بالتساوي (بافتراض أن جميع الأذرع متساوية كما هو الحال في الشكل 4,5).



الشكل 4,5 **توليد أنماط التباعدات المنتظمة.** في حقل الخلايا المنتظم (الشكل الأول اليسار) تقوم خليتان بالتمايز (الدوائر السوداء في الشكل الثاني) وتثبط الخلايا الملاصقة حولها عن التمايز، تبدأ الخلايا في المناطق الأخرى بالتمايز وتثبط جاراتها اللصيقة عن التمايز (الشكل الثالث)، ما سيؤدي في النهاية إلى نمط منتظم التباعد من الخلايا (الشكل الأخير). ويمكن لهذه الخلايا الآن أن تشكل الشعيرات والريش وغيرها من البنى (رسم جوش كليس).

تَفْعل الخلايا الأمر ذاته في توليدها للنظام في المستويات الدقيقة، والآلية العامة هي أن الخلايا التي ستتحوّل لنوع معين من البنى تخلق منطقة تثبيط محلية حولها. وحدها الخلايا الموجودة خارج هذه المنطقة تستطيع تكوين هذا النوع من البنى، والنتيجة النهائية هي نمط منتظم من الشعيرات في أجسام الحشرات والريش والحراشف والفرو في الطيور والزواحف والثدييات، وكذلك العيون المركبّة الرائعة الاصطفاف في المفصليات. جميع هذه الأنماط تولّد محلياً عبر تفاعل الخلايا وليس عبر تحديد مواقعها باستخدام الإحداثيات الجنينية. ونشوء هذه الأنماط في الجنين يظهر على هيئة أنماط منتظمة التباعد لنشاط الجينات الداخلة في النمو الإضافي لعضو ما، فجين *القنفذ* الصوتي مثلاً ينشّط في مرحلة متأخرة من نموّ الدجاجة في برعم كل ريشة قبل تكوّنها الفعلي (اللوحة 4 خ).

من البساطة يخرج التعقيد:

رؤية غير المرئي

أشار فرانسوا جاكوب ذات مرة إلى أن جميع أنظمتنا التفسيرية سواء أكانت أسطورية أم سحرية أم علمية تتشارك مبدأ عاماً واحداً. أنها تسعى وفقاً لتعبير الفيزيائي جون بيرين، «لتفسير البنى الشديدة التعقيد ظاهرياً بأجزائها البسيطة غير المرئية». أزعم هنا أن الثورة في محاولة فهم كيفية نموّ الحيوان حدثت لأننا استطعنا أن نتقدم خطوة أبعد في منطق هذه العبارة عبر جعلنا الأجزاء «البسيطة غير المرئية» مرئية. إن القدرة على رؤية الأشرطة والبقع والأربطة والخطوط وغيرها من أنماط نشاط جين عدة الأدوات الذي يرسّم بدقة تعضي الجنين إلى فصوص وأعضاء وأجزاء الجسم الأخرى توفّر العديد من لحظات النشوة الذهنية وخاصة عندما يصبح دور الجين متجلياً بوضوح بعد دراسة بحثية طويلة. الأشرطة التي تأذن بظهور الفصوص، والرُقع التي تكشف المناطق الفعالة في نشاط التعضية، والأنماط الأخرى التي ترسّم مواقع العظام والمفاصل والعضلات والأعضاء والأطراف... إلخ، كل هذه الجينات المترابطة غير المرئية تصنع الأشكال المرئية.

بالإضافة إلى ما سبق فإن النظام المتكشف وراء طريقة عمل عدة الأدوات خلال نموّ الحيوان يبدو منطقياً، فكما أن هناك نظاماً من الخطوات المتسلسلة في إنشاء الأبنية والبيوت -حيث تصب الأساسات ثم ترفع الجدران والأعمدة الداعمة، وتوضع الأرضية وتركب القنوات والأنابيب الرئيسية وتوصل أنابيب المياه والتوصيلات الكهربائية وتركب الجدران الداخلية... إلخ، فإن هناك نظاماً في إنشاء الحيوانات

بدءاً ببناء مخطط الحيوان الأساسي إلى التفاصيل الدقيقة في أجزاء الجسم. ومن هذا المنطق نفهم أيضاً كيف تتولّد البشاعات والشذوذات بسبب حدوث عطل في إحدى عمليات عدة الأدوات الجينية جرّاء طفرة ما، إذ عندما تُزال إحدى الخطوات تصبح كل الخطوات المعتمدة عليها غير سوية.

لقد ذكرت أن دور جين عدة الأدوات يسهل فهمه عندما يُمثّل بصرياً وهو يعمل. وعرضت عدة أنماط هندسية بسيطة لتوضيح الفكرة وتأكيدها، لكن بناء حيوان بأكمله عملية معقّدة. والتعقيد ينشأ بسبب العمليات المتوازية والمتتالية لجينات عدة الأدوات -عشرات من الجينات تعمل في الوقت والمكان ذاته، وجينات أخرى عديدة تعمل في أماكن مختلفة في الوقت ذاته، ومئاتٍ من جينات عدة الأدوات تعمل متتابعة مع تقدم البناء. هذه السلسلة من العمليات المتوازية والمتتابعة هي ما يصنع التعقيد.

لقد أغفلتُ الأسئلة التي ربما بدأت بالتكوّن في ذهنك وأنت تتأمل أنماط عدة الأدوات الجينية وتفكر في سلسلة جينات عدة الأدوات: ما الذي يربط حلقات هذه السلسلة؟ كيف تعرف جينات عدة الأدوات في أي ترتيب تتحرك؟ وفي أي مكان من الجنين أو جزء من الجسم تعمل؟

تتضمن صناعة حيوان مجموعة أخيرة من المضمرات الجينية، وهي عبارة عن أجهزة صغيرة في الدنا تتحكم وتدير أين ومتى تفعّل الجينات. سَأصِف في الفصل التالي هذه الأجهزة الصغيرة البديعة في الجينوم التي ترسم الأنماط الجميلة للنشاط الجيني التي رأيتها هنا، هذه الأجهزة هي

الروابط الرئيسية التي تصل سلاسل جينات عدة الأدوات التي تبني التعقيد والتنوّع في الحيوان.



المادة المظلمة في الكون (فوق) والجينوم (تحت). في الأعلى صورة للحشد المجري CL0024+1654، تظهر المادة المظلمة على هيئة ضباب في الوسط. (الصورة تقدمة وكالة الفضاء الأوروبية، وناسا، وجان بول كريب (Jean-Paul Kreib)، مرصد ميدي بيرنييه، فرنسا/معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، الولايات المتحدة). في الأسفل صورة مصفوفة دقيقة لجينوم ذبابة فاكهة، البقع اللامعة هي الدنا الذي يشفر الجينات، والبقع المظلمة هي الدنا الذي لا يتم تنشيطه. (الصورة تقدمة د. توم جينجراس (Tom Gingeras) ومؤسسة أفيمتريكس (Affymetrix)).

الفصل 5

المادة المظلمة في الجينوم: تعليمات تشغيلية لعدة الأدوات

«إنه بالفعل ضوء واهن ذلك الذي يصلنا من السماء المرصعة بالنجوم، لكن ما الذي يمكن أن يحرزه الفكر البشري لو لم نستطع رؤية النجوم؟»

جون بيرين

تأمّل قليلاً النمو من منظور البيضة، ما العمل الذي يسبق كل هذه الانقسامات والتحّركات التي تقوم بها الخلايا، ووراء صناعة طبقات الأنسجة والفصوص وجميع أجزاء الجسم؟ لقد رأينا أن النموّ يتقدم في خطوات محسوبة لكن أين هي التعليمات الخاصة بكل خطوة؟ كيف تصنع الأشرطة العريضة قبل الضيقة؟ أو كيف تتموضع بعض العظام

قبل الأخرى؟ أو كيف تكون بعض العظام طويلة ونحيلة وبعضها الآخر قصيراً وثخيناً؟ كيف تعرف جينات عدّة الأدوات أين ومتى تعمل من أجل منح الحيوان شكله؟ أين هي التعليمات التشغيلية لعدة الأدوات؟

للإجابة عن هذه الأسئلة سأرتكب مجازفتين. الأولى سأستخدم الفلك للمقارنة، وهذه مجازفة لأنني أعرف القليل فقط عن دراسة الكون، لكنني أعرف أن هناك تشابهاً بين قَوام الكون وبنية الجينوم. والثانية أنني سأخلط هذه المقارنة بمقارنة أخرى. وسأبرر ارتكابي لهاتين المجازفتين بأن هذا الفصل يقدّم بعض أصعب المعلومات ومع ذلك أكثرها كشفاً وأهمية من حيث المفاهيم في هذا الكتاب.

لقد انحصر علم الفلك في أغلب تاريخه في ما يمكن مشاهدته في السماء، بالعين المجرّدة في البداية ثم بأكثر التلسكوبات قوة. وفي حين أن ما يمكن مشاهدته يكون دائماً أقرب للفهم -مثل تكوّن النجوم وبنية المجرات وانهيار الشموس -فإن علماء الكون واجهوا مؤخراً احتمال أن يكون جزء صغير فقط من المادة في الكون قابلاً للمشاهدة (تلك التي ينبعث منها الضوء أو الموجات الراديوية)، وأن سلوك بعض الأجرام التي تُرى مثل المجرّات يتأثر بالكثير من «المادة المظلمة» (dark matter) و«الطاقة المظلمة» (dark energy) التي لا ترى.

التشابه الذي يقيمه علم الجينات مع علم الفلك هو أننا نحن علماء الأحياء كنا قادرين لعقود -بسبب بساطة الشفرة الجينية -على مشاهدة «النجوم» في الجينوم، ورؤية مواقع الجينات في الدنا بدقة. لكننا ندرك الآن أن الجينات التي رأيناها في أغلب جينومات الحيوان تشغل جزءاً

صغيراً من الدنا، فالقسم الأكبر من الدنا لدينا يتكوّن من متواليات لا تنتمي إلى الشفرة البسيطة لأي جين، كما أن وظيفتها لا يمكن أن تفك بسهولة عبر قراءة هذه المتواليات. هذه هي «المادة المظلمة» في الجينوم. وتماماً مثلما تتحكم المادة المظلمة بسلوك الأجسام المرئية في الكون، تتحكم المادة المظلمة في الدنا لدينا بالمكان والزمان الذي تستخدم فيه الجينات في عملية النمو.

سيكون هذا الفصل بأكمله عن المادة المظلمة في الدنا، وكيف أنها، بفضل تحكّمها في كيفية استخدام جينات عدّة الأدوات، تحوي التعليمات اللازمة لصناعة وتنميط أجزاء الجسم. هذه التعليمات مبيّتة في المادة المظلمة على هيئة *مفاتيح جينية* (genetic switches) (المقارنة الثانية). لعلك لم تسمع عن المفاتيح قبل هذا الكتاب، فهي لم تلقَ الاهتمام الذي يليق بها سواء في المختبر أو الإعلام، ولم يكن ذلك بسبب عدم أهميتها العلمية، بل بسبب التحدي الذي واجه علماء الأحياء لاكتشاف هذه المفاتيح ومعرفة كيفية عملها. لقد تمكّن علماء الأحياء الجزيئية في وقت حديث نسبياً فقط من الرؤية في الظلام وكشف مواقع وخواص هذه المفاتيح. إن الخاصية الأكثر إدهاشاً وحسماً في المفاتيح الجينية هي قدرتها على التحكم بالتفاصيل الدقيقة جداً لعمل جينات عدة الأدوات وقدرتها على التحكم بالتفاصيل التشريحية أيضاً. فالبنية التشريحية لجسم الحيوان تشفر فعلاً وتبنى قطعة قطعة وشريطاً شريطاً وعظمة عظمة بواسطة كوكبات من المفاتيح الموزّعة في أنحاء الجينوم.

تلعب المفاتيح دوراً رئيسياً في كلا المسرحين: النموّ والتطوّر. فهي التي ترسم الأنماط الجميلة للنشاط الجيني الذي رأيناه في الفصل

السابق، وهي التي تشفّر التعليمات الخاصة بكل نوع حيواني وذلك هو بالتحديد ما يمكّن الحيوانات المختلفة من أن تُصنع باستخدام عدة الأدوات ذاتها. والمفاتيح هي المحرّك النشط للتطوّر (إنها المنبع الحقيقي لسرور كِبلينج)، وصانعات البقع والأشرطة والحدبات وما شابهها. وهذه الأجهزة الرائعة، التي تشبه الحاسوب الجيني في جزء منها والفنّان في جزء آخر، تترجم جغرافيا الجنين إلى تعليمات جينية لصناعة شكل ثلاثي الأبعاد.

الرؤية في الظلام

في علميْ الكون والأحياء، كما هو الحال في بقية العلوم، يُكتشف وجود كينونات معينة إما من خلال رصدها بطريقة مباشرة عبر الملاحظة وإما بطريقة غير مباشرة من خلال رصد تأثيرها على الكينونات التي تسهل رؤيتها أو قياسها. وجميع الأدلة على وجود المادة المظلمة في الكون غير مباشرة، مبنية على مراقبة سرعات المجرات ودورانها والاستدلال تبعاً لذلك بأن هناك قدراً كبيراً من المادة داخل المجرات لا نستطيع رؤيته. وعلماء الكون والفيزيائيون ليسوا متأكّدين بعد مم تتكوّن هذه المادة المظلمة.

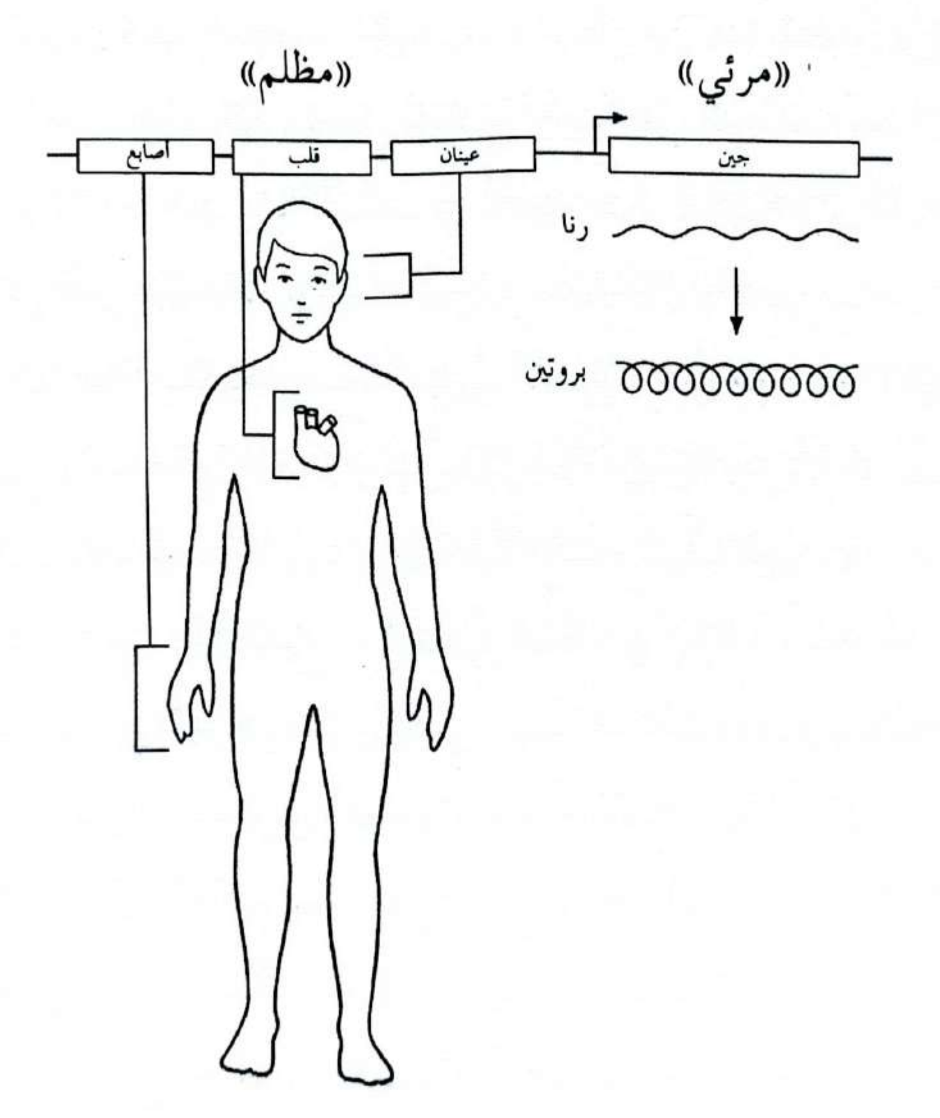
إن فهمنا للمادة المظلمة في الجينوم أفضل بكثير لأننا نعرف مم تتكون (من الدنا)، ونستطيع عزلها ودراسة خواصها بطريقة مباشرة وغير مباشرة. وإحدى الطرق الفعالة في دراسة الدنا غير المشفر «المظلم» هي عبر إلصاق قطعة منها بجين يشفّر بروتيناً يمكن تمثيله بصرياً، مثل إنزيم يصنع منتجاً ملوّناً عند التفاعل أو بروتين يلمع عند تعريضه لضوء

معين. وعبر إدخال هذه القطع المهندَسة مرة ثانية إلى الجينوم ثم معاينة الأنماط الملوّنة تحت المجهر نستطيع رؤية التعليمات، إن وجدت، التي تحويها هذه القطعة المحدّدة من المادة المظلمة (شريط هنا، وبقعة هناك... إلخ). لا تحتوي المادة المظلمة في أغلبها على أي تعليمات(junk)، وهي مجرد سد فراغات تكدّست خلال مسيرة التطوّر. ففي الإنسان على سبيل المثال، تحوي حوالي 2 إلى 3 بالمائة من مادتنا المظلمة مفاتيح جينية تتحكّم في كيفية استخدام الجينات. سأجعل من هذا الفصل بأكمله إجابة عن سؤال: كيف تعمل المفاتيح الجينية على التحكّم بعملية نمو الحيوان؟ وستكون بقية الكتاب في أغلبها حول الكيفية التي أدّت بها التغيرات في هذه المفاتيح إلى تشكيل وصياغة عملية التطور.

لقد قدمت لمفهوم المفتاح الجيني في الفصل الثالث عبر وصف النظام الجيني لاستخدام اللاكتوز وبكتيريا *إي كولاي*. وذكرت أن التحكّم في تركيب الإنزيمات المستورِدة والمفكّكة للاكتوز في البكتيريا يتم بواسطة مفتاح جيني، هذا المفتاح عبارة عن قطعة من متوالية دنا توجد قبل الجينات التي تشفر هذه الإنزيمات. وعند غياب اللاكتوز يرتبط الكاظم الجيني بمتوالية معيّنة من الدنا في المفتاح ويوقف النسخ، أما عند تواجد اللاكتوز فإن الكاظم يسقط عن المفتاح سامحاً للجين المفكّك للاكتوز بالعمل.

إن المفاتيح الجينية في الحيوانات أعقد قليلاً، إذ إن متواليات الدنا لديها أطول عادة. وهي محاطة بعدد أكبر من البروتينات وأكثر تنوّعاً، بعض هذه البروتينات يُفعّل النسخ، وبعضها يكبحه. ومن خلال «حساب» المدخلات المتعدّدة للبروتينات تحوّل المفاتيح المجموعات

المعقّدة من المدخلات إلى مُخرَجات أبسط نراها على هيئة أنماط ثلاثية الأبعاد لتشغيل وإيقاف النشاط الجيني، مثل تلك الأشرطة والبقع في الفصل الرابع. من المهم الإشارة هنا إلى أن الجين الواحد يمكن أن يُنظمَ بواسطة عدة مفاتيح منفصلة بحيث يُستخدم عدة مرات وفي أماكن مختلفة مثل نمو القلب والأعين والأصابع (الشكل 1,5).



الشكل 1,5 تحدد المفاتيح الجينية في أي مكان من أنسجة الجسم تستخدم الجينات. يمتلك هذا الجين مفاتيح تتحكم بنشاطه في القلب والأعين والأصابع، إن وجود عدة مفاتيح تنشط في مختلف أجزاء الجسم النامية حالة نموذجية في جينات عدّة الأدوات. (رسم ليان أولدز).

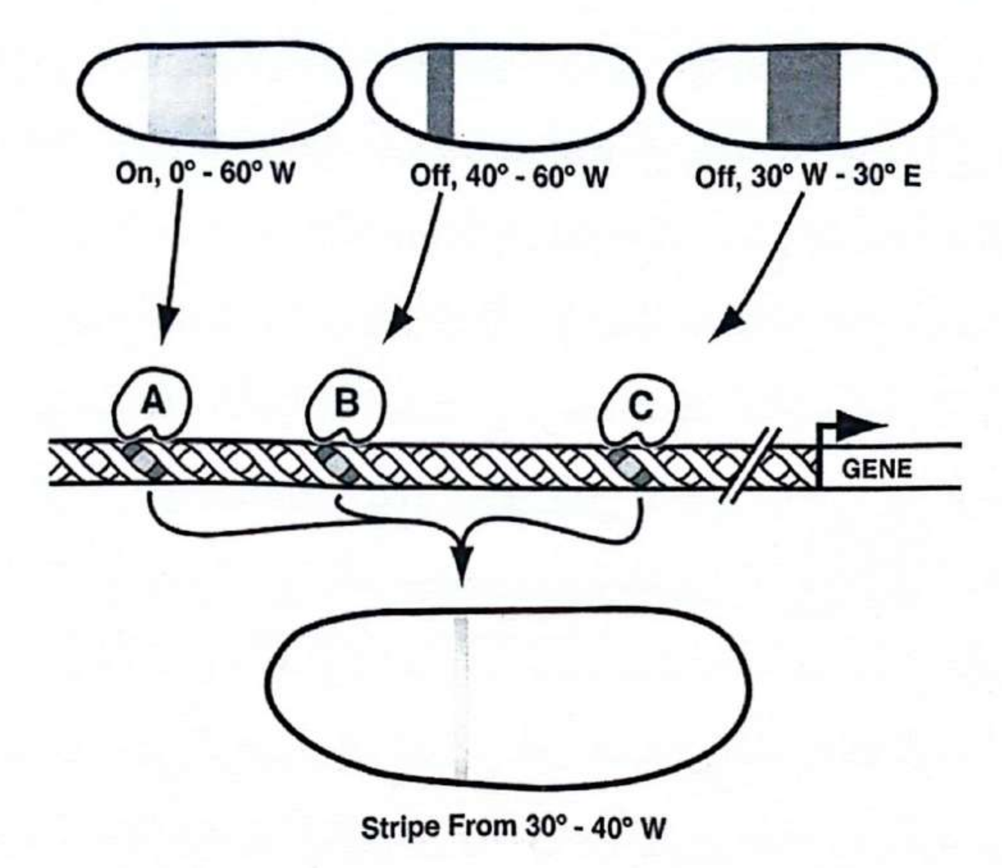
إن وجود المفاتيح يوسّع فهمنا لكيفية عمل الجينات. وعندما يتحدث علماء الأحياء عن الجينات فإنهم يقصدون عادة قطع الدنا التي تفك شفرتها إلى بروتينات، والتي تقوم بدورها بالأعمال في الخلية. أما المفاتيح فلا تفك شفرتها إلى أي شيء، إذ إن وظيفتها في الدنا تنظيمية. ويعتمد الجين في القيام بجميع وظائفه الاعتيادية على المعلومات الآتية من جميع مفاتيحه. فالجين الذي يمتلك ثلاثة مفاتيح يتكوّن من أربعة أجزاء منفصلة: جزء تشفير وثلاثة أجزاء تنظيمية (الشكل 1,5). ويمكن أن تسبّب الطفرات في أحد المفاتيح تأثيرات تشريحية مذهلة. سأواصل بقية الكتاب مستخدماً المعنى النمطي «للجين» باعتبار وظيفته مشفراً للبروتين، وعندما أتكلم عن المفاتيح سأوضح ذلك.

المفاتيح باعتبارها أجهزة تحديد مواقع أرضية

لقد رأينا أن جينات عدّة الأدوات تنشط تبعاً لإحداثيات ثلاثية الأبعاد في الأجنّة. لكن كيف تُنقل الإحداثيات الفراغية للجنين على هيئة تعليمات تشغل الجينات وتوقفها في أنماط دقيقة؟ تعمل المفاتيح الجينية كأجهزة النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS). ومثلما يحدّد هذا الجهاز الموجود في قارب أو سيارة أو طائرة الموقع بتكامل عدة مدخلات، تدمج المفاتيح معلومات المواقع في الجنين بالنسبة لخطوط الطول والعرض والارتفاع والعمق ثم تعطي التعليمات بالأماكن التي تشغل أو توقف فيها الجين. سأشرح وأوضح كيفية عمل المفاتيح ببعض الأمثلة. يجب أن تؤخذ هذه الأمثلة على أنها لقطات قصيرة جداً من الفيلم الكامل لنموّ الحيوان. فالفيلم السينمائي الكامل يتضمن عشرات

الآلاف من المفاتيح التي تعمل متوازية ومتوالية. لن نشغل أنفسنا بكل لقطة فيه فالمهم أن نفهم المنطق والخصوصية الكامنة في هذه المفاتيح.

إن الوظيفة العامة للمفتاح هي تحويل الأنماط القائمة من النشاط الجيني إلى أنماط جديدة من النشاط الجيني. ومن أفضل الأمثلة الجيدة لتوضيح عمل المفاتيح الجينية هو كيفية تحديد رباط أو شريط طولي على طول المحور شرق-غرب في جنين ذبابة. تُنشِّط أشرطةٌ بعرض 15–25 خلية في بداية نمو الجنين بروتيناتٍ محددة من عدة الأدوات في مواقع مختلفة على طول المحور، يرتبط كل بروتين منها بمتوالية محدّدة من الدنا يتراوح طولها بين 6–9 زوج قواعد. إن تعرّف بروتينات عدة الأدوات على متواليات الدنا يشبه الطريقة التي يتعرف فيها مفتاح محدد على قفل، والقفل هنا هو متوالية محددة في الدنا سأشير إليها باسم المتواليات «التوقيعية» (signature sequence) لأنها تختلف باختلاف بروتينات عدة الأدوات. تحتوي المفاتيح التي تتحكّم في جين معين على نسخ من هذه المتواليات التوقيعية وتَشْغلها بروتينات عدة الأدوات الخاصة بها في أنوية الخلايا، حيثما تكون بروتينات عدّة الأدوات موجودة في الجنين، في المثال في الشكل 5 ,2، ينشط بروتين عدة الأدوات (A) من 20° إلى 60° غرباً والبروتين (B) من 40° إلى 60° غرباً، والبروتين (C) من 30° غرباً إلى 30° شرقاً، البروتين A مُفعِّل (activator) بينما البروتينان B وC كاظمان للجين X. وعموماً يكون القانون كالتالي: أينما وجدت الكواظم فإنها تلغي المفعِّلات وتمنع الجين من العمل. إن مفتاح الجين X يحوي أماكن للبروتينات A وB وC، وستشْغَل البروتينات هذه الأماكن في توليفات مختلفة على طول المحور.



الشكل 2,5 **تدمج المفاتيح عدة مدخلات لرسم شريط من النشاط الجيني.** يُنشّط مفعّلٌ واحد (A) وكاظمان (B وC) على خطوط طول مختلفة، والناتج النهائي للمفتاح هو شريط ضيق (رسم جوش كليس).

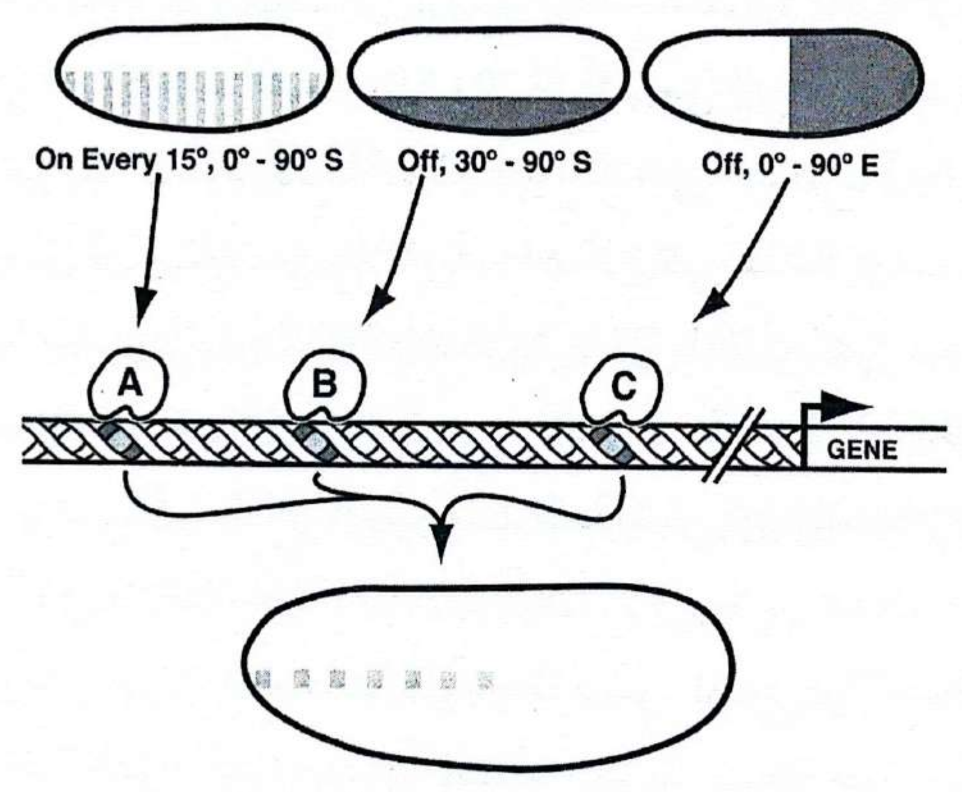
في الخلايا من 90° إلى 60° غرباً، لا يتواجد أي من هذه البروتينات في المفتاح ويكون الجين في حالة إيقاف. في الخلايا من 60° إلى 40° غرباً يشغل البروتينان A وB المفتاح معاً ويكون الجين في حالة إيقاف أيضاً. وفي الخلايا من 40° إلى 30° غرباً يشغل البروتين A فقط المفتاح ويكون الجين في حالة تشغيل، وفي الخلايا من 0° إلى 30° شرقاً، يشغل البروتين C فقط المفتاح ويكون الجين في حالة إيقاف. وبحساب ثلاثة مدخلات طولية يسمح المفتاح بتشغيل الجينَ في شريط عرضه 10°، وهذا يعني ترجمة ثلاثة أنماط عريضة من النشاط الجيني إلى شريط واحد ضيق. لا يتموضع هذا الشريط من خلال تعليمة تشغيل وحيدة تقول «شغّل الجين من 30° إلى

40° غرباً»، بل بتحديد حدودها عبر توليفة من مدخلات الإيقاف.

لعلك تتساءل من أين أتت أنماط بروتينات عدة الأدوات A وB وC؟ سؤال جيد. هذه الأنماط بدورها تتحكّم بها أيضاً مفاتيح موجودة في الجينات A وB وC، تدمج أيضاً مدخلات من بروتينات أخرى من عدة الأدوات أُنتجت في مرحلة سابقة من نمو الجنين. لكن من أين أتت هذه المدخلات الأخيرة؟ تبقى الإجابة كما هي: من مرحلة سابقة من نموّ الجنين. أعرف أن المسألة تبدو الآن كأحجية البيضة والدجاجة: أيهما وُجد أولاً! غير أن تعقب المعلومات الفراغية في الجنين يتسلسل حتى الوصول إلى التوزيع غير المتساوي للجزيئات المودعة في البيضة خلال إنتاجها في المبيض والذي يبدأ تكوين المحورين الرئيسيين في الجنين (بالتالي فالبيضة جاءت فعلاً قبل الدجاجة). لن أقوم بتعقّب هذه الخطوات فالمهم هنا هو معرفة التالي: إن ما يقذفه أي مفتاح يكون استجابة لحدث سابق، وأن المفتاح بتشغيل جينه في نمط جديد يثير بالمقابل المجموعة التالية من الأنماط والأحداث في عملية النموّ.

يمكن أن تدمج المفاتيح أي توليفة من خطوط الطول والعرض والعمق والارتفاع. يقدم الشكل 3,5 مثالاً على مفتاح يدمج عدة مدخلات من محاور مختلفة موضحاً الآلية الفعلية لكيفية تحديد مواقع الطرف في جنين الذبابة. يدمج مفتاح في جين *Dll* الباني للأطراف مدخلات خطوط الطول والعرض معاً لرسم عدة بقع من نشاط *Dll* على طول المحور الرئيسي للجسم. هذه المدخلات مشتقة من أنماط سابقة الوجود وهي تتركب من أنواع مختلفة من بروتينات عُدة الأدوات. يُوزع أحد المفعّلات كل 15° على طول المحور شرق-غرب

داخل كل فص لكن فقط في نصف الكرة الجنوبية (0° إلى 90° جنوباً). ويوزع كاظمان من 30° إلى 90° جنوباً، بينما ينتشر الثاني وعلى جميع خطوط الطول الشرقية، وينتج دمج هذه المدخلات الثلاثة نمطاً من نشاط *Dll* في عناقيد صغيرة من الخلايا على الخطوط 90°، 75°، 60°، 45°، 30°، 15° غرباً، ومن 0° إلى 30° جنوباً.



الشكل 3,5 دمج خطوط الطول والعرض يحدّد مواقع عناقيد صغيرة من الخلايا ستتحول لاحقاً إلى أطراف (رسم جوش كليس).

تعتبر سلامة المفاتيح من أي عطب أمراً على درجة عالية من الأهمية للحصول على نموّ طبيعي، وإذا قُوطع مفتاح أو انكسر بفعل طفرة ما فلن يتم إدماج المدخلات المناسبة. والعديد من الطفرات المذهلة التي رأيناها -ذباب بأرجل خارجة من رؤوسها أو بشر بست أصابع في

الأيدي أو الأقدام –سببها مفاتيح مكسورة تشغِّل جينات عدّة الأدوات في الموقع الخطأ داخل الجنين أو في أحد أجزائه.

قوة المنطق التوافقي وعظمته

تختلف بنية كل مفتاح عن الآخر، ويبلغ متوسط طول المفتاح الواحد عادة عدة مئات من أزواج قواعد الدنا. وفي هذا الامتداد يمكن أن يكون هناك ما بين 6 و20 أو أكثر من المتواليات التوقيعية لعدّة بروتينات. وتتوقّف استجابة مفتاح لمدخل خط طول أو عرض أو عمق أو ارتفاع على ثلاثة متغيّرات ترتبط بهذه المتواليات التي ترتبط بها بروتينات عدّة الأدوات المنتشرة على طول أي محور من هذه المحاور أو المتواجدة في أي نسيج من الأنسجة. وتحدَّد الأنماط الخاصة التي يرسمها أي مفتاح بالمجموعات المحدّدة من المتواليات التوقيعية المشفّرة في دنا المفتاح.

وحتى نفهم المعلومات الموجودة داخل المفتاح والاحتمالات الضخمة لتنوّع المفاتيح، عليّ إضافة معلومة بسيطة حول طبيعة بروتينات عدة الأدوات والمتواليات التوقيعية في المفاتيح. وما سأقدمه مجرد شرح مختصر للإمكانيات التي يوفرها استخدام الأدوات ذاتها في توافقيات مختلفة، إن التطابق التام في المقارنة ليس مهماً، لكن الأكثر أهمية هنا هو استيعاب قوة وكفاءة المنطق التوافقي (combinatorial logic).

المتواليات التوقيعية التي تتعرف عليها بروتينات عدة الأدوات قصيرة، يتراوح طولها عادة من 6–9 أزواج قواعد لكنها يمكن أن تكون أطول. كما يمكن للعديد من المتواليات التوقيعية المختلفة أن توجد

في امتداد مفتاح واحد متوسط الطول. وهناك العديد من المتواليات التوقيعية المحتملة. المتوالية المكوّنة من 6 أزواج قواعد تمتلك 4096 تبديلاً (permutation) لقواعد الدنا الأربعة: (A.C.G.T) (رياضياً $4^6 = 4096$)، وتمتلك المتوالية المكوّنة من 7 أزواج قواعد (4^7) تمتلك 16,384 تبديلاً، وتمتلك المتوالية المكوّنة من 8 أزواج قواعد 65,536 تبديلاً. يتعرف بروتين عدّة الأدوات عادة على عائلة من متواليات القواعد المتقاربة، إذ إن هناك نوعاً من المرونة في القواعد الفردية داخل المتوالية التوقيعية، لكن حتى مع هذه المرونة تظل بروتينات عُدّة الأدوات انتقائية جداً في اختيار جزء الدنا الذي ترتبط به. وعموماً فإن بروتينات عُدّة الأدوات المختلفة تتعرف إلى متواليات توقيعية مختلفة. وفيما يلي قائمة مختصرة لبعض بروتينات عدّة الأدوات التي ترتبط بالدنا والمتواليات التوقيعية التي تتعرف إليها هذه البروتينات:

Pax-6 (عديم العين)	KKYMCGCWTSANTKMNY
رجل الصفيح	TCAAGTG
ألترابيثوراكس	TTAATKRCC
(Dorsal) الظهري	GGGWWWWCCM
(Snail) الحلزون	CAGCAAGGTG

حيث:

R = A أو G

Y = C أو T

K = G أو T

M = A أو C

S = C أو G

W = A أو T

N = A أو C أو G أو T

تحوي عدة الأدوات في الحيوان بضع مئات أو يزيد من البروتينات لفيفة الدنا، لمعظمها تفضيلات فريدة مختلفة. وهناك عدد خيالي من التوافقيات الممكنة للمتواليات التوقيعية في المفاتيح. إذا افترضنا وجود 500 بروتين لفيف للدنا في عدة أدوات حيوان ما فهذا يعني وجود 500×500 = 250,000 زوج من التوافقيات المختلفة من المتواليات وبروتينات عدّة الأدوات. وهناك 500×500×500 = 12,500,000 توافقية مختلفة ثلاثية العناصر و6 بلايين توافقية مختلفة رباعية العناصر، هذه الحسابات توضح قوة المنطق التوافقي لعدّة الأدوات والمفاتيح الجينية. ويرجع التنوّع الكبير للمفاتيح إلى استخدام المتواليات التوقيعية نفسها وبروتينات عدة الأدوات في عدد هائل من التوافقيات. يمكنك تخيل البديل الذي سيكون عبارة عن وجود عدد كبير من بروتينات عدّة الأدوات، غير أن استخدام 500 بروتين في توافقيات مختلفة أكثر كفاءة بكثير من تشفير 250,000 بروتين مختلف (وهذا الرقم يعادل حوالي عشرة أضعاف عدد البروتينات التي يشفرها جينومنا بأكمله).

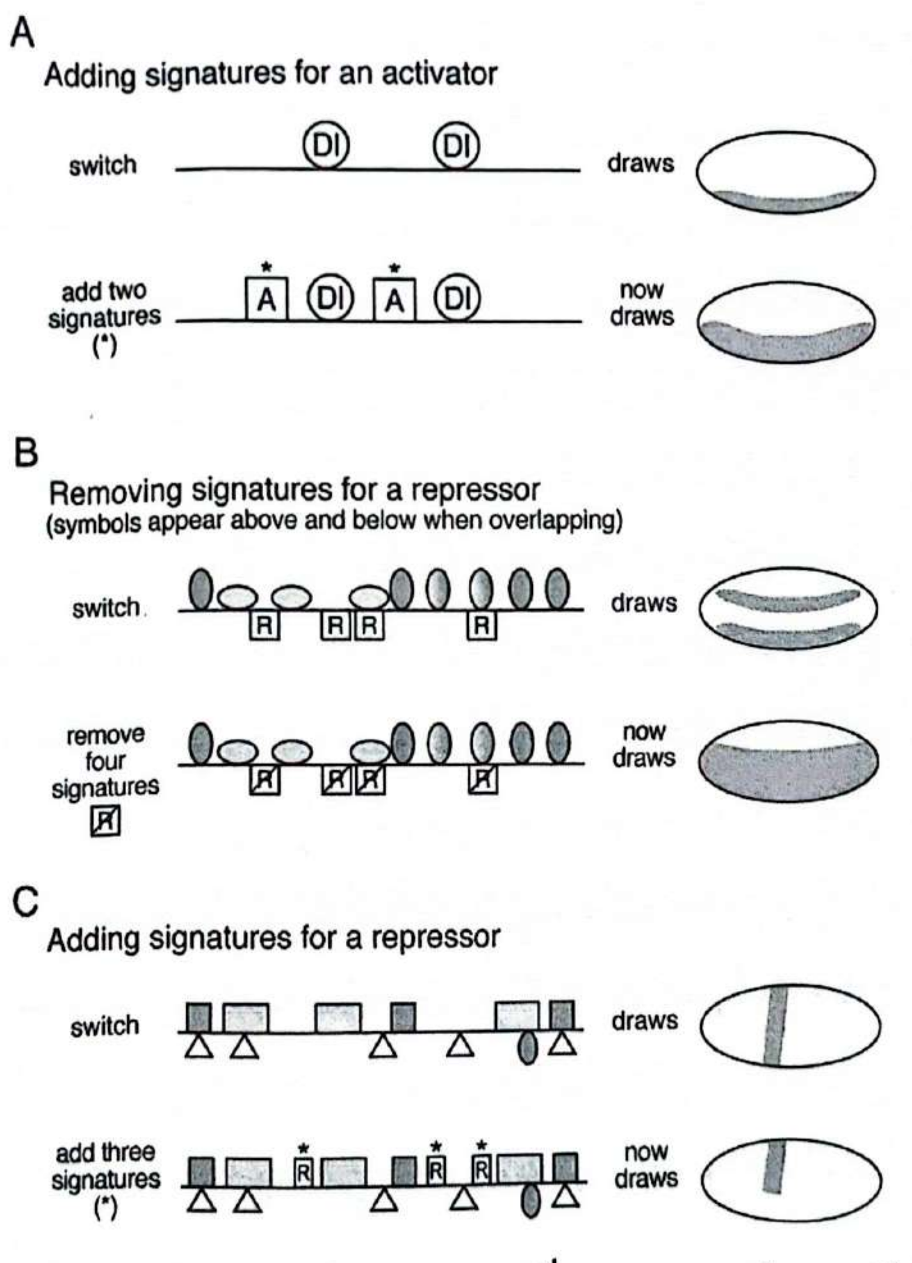
اسمحوا لي بإضافة أخرى قصيرة أعزّز بها فكرة قوة المنطق التوافقي في الأحياء. فقد رأينا هذه القوة سابقاً في سياق مختلف كلياً هو نظامنا المناعي الذي يستطيع التعامل مع التنوّع الهائل لمسبّبات الأمراض

المحتملة التي تعيش داخل أجسامنا وحولها من خلال صناعة بروتينات الأجسام المضادة (antibodies) والتي ترتبط ببروتينات هذه الغزاة وسكرياتها ودهونها. إننا نمتلك القدرة على صناعة ملايين الأنواع من بروتينات الأجسام المضادة، وهذه الإنتاجية العالية تتولّد بواسطة توافق عدد متواضع (بضع مئات) من مناطق جينات الأجسام المضادة وسلاسل الأجسام المضادة بطرق مختلفة وليس عبر تشفير الملايين من جينات الأجسام المضادة المختلفة.

لقد تجلّت براعة المفاتيح والمنطق التوافقي من خلال التجارب التي أجريت على محتوى متواليات الدنا من المفاتيح. فإضافة متواليات توقيعية إلى المفاتيح أو نزعها منها ومراقبة كيف تتغيّر الأنماط التي ترسمها تغيراً واضحاً يبرهن بجلاء على المرونة العالية التي تتمتع بها المفاتيح. ويعد مايك ليفين وزملاؤه في جامعة كاليفورنيا-بيركلي روّاد استكشاف المنطق التوافقي لصناعة الأشرطة على امتداد محوري جنين الذبابة، وقد كشفت أبحاثهم عن الآليات البسيطة والأنيقة لصناعة الأنماط.

يعرض الشكل 2,5 المنطق الأساسي لصناعة شريط طولي (على خطوط الطول) في جنين ذبابة حديث التكوّن. والفكرة ذاتها تنطبق على رسم الأشرطة على خطوط العرض. ويتوقّف الموقع الدقيق للشريط على قوة المدخلات في المفتاح. ومن طرق زيادة قوة المدخل إضافة نسخ أكثر من متوالية توقيعية إلى المفتاح. لنأخذ مثالاً، يفعّل شريط عرضي (أفقي) من النشاط الجيني الذي يحدث على طول امتداد الجنوب الأقصى من جنين الذبابة بواسطة بروتين عُدة أدوات تتدرج كثافته من الجنوب إلى

الشمال. يحوي المفتاح عادة متواليتين فريدتين لهذا البروتين، عند إضافة نسختين من متوالية توقيعية لبروتين آخر إلى هذا المفتاح فإن الشريط يتوسع إلى أكثر من ضعفي عرضه الأصلي، ويغطّي مساحة إضافية من نصف كرة الجنين الجنوبي (الشكل 4,5 أ).



الشكل 4,5 (أ) إضافة مواقع لمُفَعِّل توسع مساحة نمط النشاط الجيني، (B) إزالة مواقع لكاظم توسع مساحة نمط النشاط الجيني، (C) إضافة مواقع لكاظم تزيل جزءاً من نمط النشاط الجيني (رسم جوش كليس).

بالمقابل يمكن إضعاف المدخلات عبر تقليص عدد المتواليات التوقيعية الموجودة في المفتاح أو حتى إزالتها جميعاً. وإذا كانت هذه المتواليات التوقيعية لمفعِّلات، فإن المفتاح يمكن أن يُشلّ تماماً. وإن عُدّلت المتواليتان التوقيعيتان في مفتاح الشريط الجنوبي السابق فإنه يصبح خاملاً، أما إذا حذفت متواليات توقيعية لبروتينات كاظمة فإن الأنماط المرسومة بواسطة هذه المفاتيح ستتمدد. يظهر نمط شريط عرضي (أفقي) آخر رُسم بواسطة مفتاح آخر. يبلغ عرض هذا الشريط 20° ويمتد من 40° إلى من 60° جنوباً ولا يدخل في المنطقة الجنوبية القصوى من الجنين. يحوي المفتاح المتحكم بهذا الشريط أربع نسخ من متوالية توقيعية يتعرف عليها كاظم يتواجد في المنطقة الجنوبية القصوى من الجنين وإذا عدلت هذه المواقع بحيث يعجز الكاظم عن الارتباط بالمفتاح فإن النمط الذي يرسمه المفتاح يمتد كلياً ليصل إلى القطب الجنوبي (الشكل 5,4 ب).

تكشف هذه التجارب البسيطة كيف أن رسم الموقع الجغرافي لشريط يُضبط بواسطة نسق المتوالية التوقيعية التي يحويها. إن جعل المفتاح يرسم أنماطاً محددة بالنسبة للمحورين ناجم ببساطة عن احتوائه على متواليات توقيعية لبروتينات عدّة الأدوات التي تعمل على طول المحورين. وإذا أضاف أحدهم متوالية توقيعية لهذا الكاظم الذي ينشط في الجنوب الأقصى من الجنين إلى شريطٍ طولي فستتم إزالة الشريط من الجنوب (الشكل 5,4 ج).

توضح جميع هذه التجارب البسيطة كيف أن إضافة أو حذف أو تغيير بضع قواعد في المفتاح يمكن أن تغير الأنماط الناتجة. وتمثل هذه

الإيضاحات الأنيقة مقدّمات مهمة لفهم الكيفية التي يُصاغ بها التطوّر عبر التغيرات التي تحدث في المفاتيح من خلال اكتسابها أو فقدها التطوّري لمتواليات توقيعية. بحوزتي الكثير لقوله حول الأمر لاحقاً لكن من المفيد أن نبدأ من الآن في التفكير في الاحتمالات ونحن نتعمّق أكثر في عالم المفاتيح الجينية.

شريطاً شريطاً، عظمة عظمة:

الكل هو مجموع العديد من الأجزاء

كانت الجينات التي تُنشّطُ على هيئة أشرطة في جنين الذبابة الحديث التكوّن من أوائل الجينات التي اختُبِرَت مفاتيحها. وكان أكثر الكشوفات الناتجة عن عزل هذه المفاتيح واختبارها إدهاشاً هو أن كل شريط في الأنماط ذات الأشرطة المتعددة يُشفر بواسطة مفاتيح منفصلة. على سبيل المثال بالرغم من أن الأشرطة السبعة لبعض أنماط عدّة الأدوات تبدو متشابهة جداً ومتباعدة بالتساوي إلا أن كل شريط يُرسم بواسطة مفتاح مختلف يدمج توافقيات مختلفة من المدخلات الطولية. يبدو الأمر في البداية وكأن عدداً هائلاً من الآليات والماكنات مُسخّر لصناعة نمط واحد فقط، لكن بناء الأنماط الشريطية شريطاً شريطاً في جنين الذبابة كان التلميح الأول لفهم القانون العام الذي يقول إن النمط الكامل لأي جين من عدّة الأدوات هو في الحقيقة مجموع عدة أجزاء، كل جزء منها يُدار بواسطة مفتاح معين.

أضاء هذا الكشف عن كيفية عمل مفاتيح صناعة الأشرطة المبحثَ الذي كان عصياً على الحل ردحاً طويلاً من الزمن حول تكوّن الأنماط

في البنى الأحيائية. لقد انجذب الرياضيون وعلماء الحاسوب طيلة عقود إلى الأنماط الدورية لتفصيص الجسم وخطوط الحمر الوحشية وعلامات الأصداف البحرية. وسعى عدد من صُنّاع النظريات إلى شرح الكيفية التي تنتظم بها الأنماط الدورية في بناء ضخم مدفوعين بالورقة البحثية التي كتبها العبقري ألن تورنج (Alan Turing) (مؤسس علم الحاسوب، الذي ساهم في كسر الشفرة الألمانية خلال الحرب العالمية الثانية) والتي حملت عنوان «الأساس الكيميائي للتشكّل» (The Chemical Basis of Morphogenesis). ورغم جمال النماذج والمعادلات إلا أنه لم يتم تأييد هذه النظرية بأي كشف في العشرين سنة الأخيرة. لم يتصوّر الرياضيون أن المفاتيح الجينية المدولية تحمل مفتاح تكوّن الأنماط أو أن الأنماط الدورية التي نراها هي في الحقيقة مركّبة من عدد ضخم من العناصر المفردة.

ربما لا يمتلك الجين فقط عدة مفاتيح لأنماط جزئية مختلفة لنشاط جيني يظهر في وقت معين، بل غالباً ما يكون لديه مفاتيح مختلفة تتحكّم في أنماط مختلفة تماماً في أنسجة متغايرة وفي مراحل مختلفة من النموّ. فنادراً ما تكرّس جينات عدة الأدوات، إن حدث ذلك أصلاً، لعملية نموّ مفردة، وإنما يعاد استخدامها مراراً وتكراراً في النموّ في سياقات مختلفة لبناء وتشكيل الجنين النامي. تمنح هذه المفاتيح جينات عدّة الأدوات المفردة تعدّدية كبيرة في الاستخدام. وعملياً يتم التحكّم بكل جين من عدّة الأدوات عبر عدة مفاتيح. وليس من غير الشائع وجود عشرة مفاتيح أو أكثر للجين الواحد، بل إننا على الأرجح نجهل الحدّ الأعلى للمفاتيح التي توجد في الجين إن وجد هذا الحدّ أصلاً.

يتحقّق بناء الأجسام وأجزائها بمجموع عدّة عمليات تتحكّم فيها المفاتيح؛ فالبناء الضخم والمعقّد للهيكل العظمي في الفقاريات يُشفر ويُنشّأ عظمة عظمة بواسطة صف من المفاتيح تعشش حول جينات عدّة الأدوات. إحدى عوائل بروتينات عدة الأدوات المهمة لنمو الهيكل العظمي هي بروتينات تشكّل العظم (BMPs)، سميت بذلك لأنها تحمل خاصية تطوير تكوّن الغضروف والعظم. توضح عملية التحكّم في أحد أفراد هذه العائلة، جين BMP5، بجلاء كيف تشفّر الأجزاء التشريحية كل على حِدة من خلال مفاتيح جينية مختلفة.

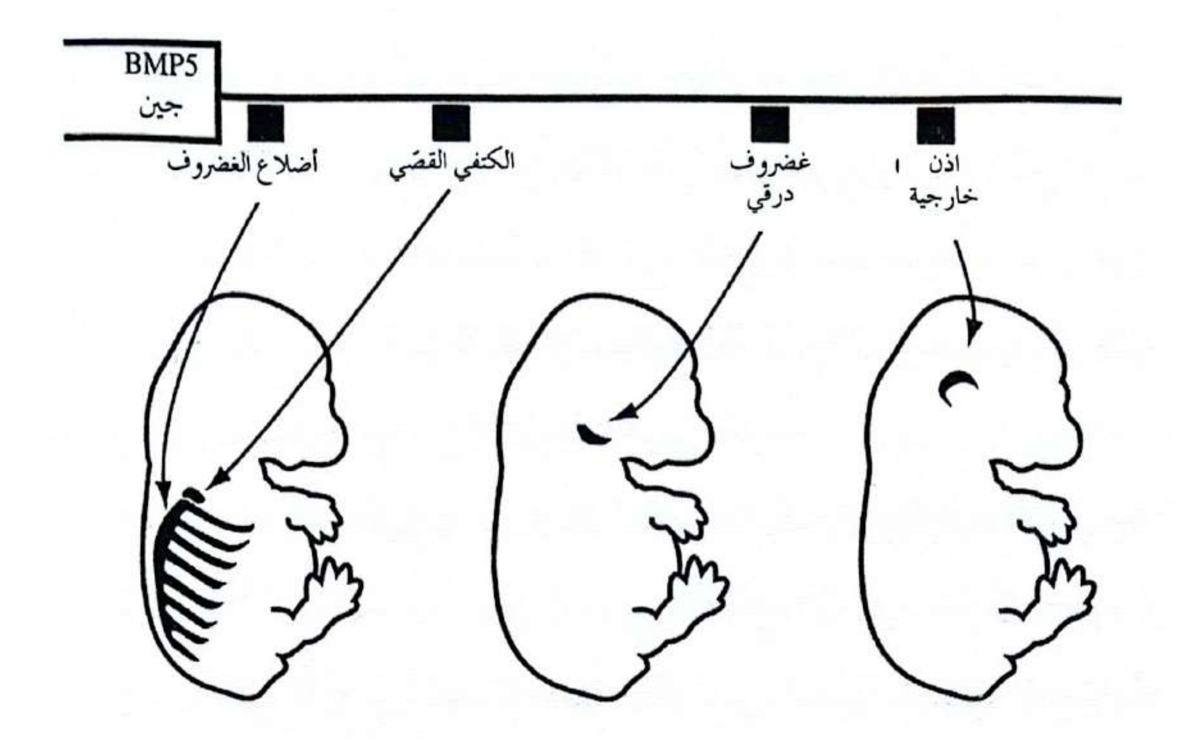
تحيط المفاتيح بجين BMP5. هناك مفاتيح مختلفة لنشاطه في الأضلاع وأطراف الأصابع والأذن الخارجية والأذن الداخلية والفقرات والغضروف الدرقي والجيوب الأنفية وعظم القص وغيرها من الأعضاء (الشكل 5,5). وفي جميع هذه الأنماط والأماكن والأوقات المختلفة يتم إنتاج البروتين ذاته، إذ أن خصوصية كل عملية وتعقيد النمط الكلي يعود في مجموعه لصفيف من المفاتيح. ووجود مفاتيح مختلفة لكل جزء من هذه الأجزاء يظهر التحكّم البالغ الدقة المتوفّر لبناء وتشكيل جميع أجزاء الجسم.

وفرة المفاتيح

إن التنوّع المذهل والتخصص الجغرافي المتقن للمفاتيح ينشأ عن استخدام المنطق التوافقي. ولأن توافقيات المدخلات تحدد مخرجات المفتاح، والتوافقيات المحتملة للمدخلات تزداد أضعافاً مضاعفة مع كل مدخل إضافي، فإن المخرجات المحتملة تبدو لانهائية. تخيل الاحتمالات

الناتجة عن جمع أربطة وأشرطة وخطوط وبقع ورقع ونقاط للمفعّلات والكواظم وإمكانية رسمها في أي مكان وفي أي نسيج وبأي توافقية. إن جميع الأنماط ممكنة، وقد اكتشفت المفاتيح التي ترسم تنوّعاً ضخماً من الأنماط في جينومات للحيوانات. وتستطيع المفاتيح أن ترسم، بل ترسم بالفعل، أي نمط هندسي من النشاط الجيني تقريباً.

رغم أن عدد التوافقيات المحتملة للمدخلات والمتواليات التوقيعية ضخم جداً، إلا أن العدد الفعلي لمجموع المفاتيح في أي حيوان محدود. ولا يختلف كل مفتاح اختلافاً كلياً. فلتنسيق عملية النموّ، وخاصة صناعة نوع معيّن من الخلايا المكرّسة لوظائف محددة، غالباً ما تتشارك المفاتيح في الجينات المختلفة مدخلاً واحداً أو أكثر (وبالتالي فهي تتشارك متوالية توقيعية أو أكثر). على سبيل المثال، لأداء وظيفة خلايا العضلات يجب إنتاج مجموعة من البروتينات تمكن الخلايا من الانقباض والاستفادة سريعاً من مصادر الطاقة وإزالة المخلفات بكفاءة خلال النشاط العضلي. تفعّل الجينات التي تشفر هذه البروتينات في خلية العضلة بواسطة مفاتيح تحتوي على متواليات توقيعية مشتركة يتعرف عليها بروتين عدة الأدوات ذاته. والأمر ذاته صحيح في الأنواع الأخرى من الخلايا مثل العصبونات ومستقبلات الضوء في العينين وخلايا البنكرياس والخلايا النخامية... إلخ. فوظائف العضو تعتمد عموماً على واحد أو بضعة بروتينات من عدّة الأدوات التي تلتصق بمتواليات معينة تنتمي لعدة جينات داخل الجينوم.



الشكل 5,5 تتحكم المفاتيح في نشاط جين BMP5 في أجزاء مختلفة من جنين الفأر النامي. (نقلاً عن رسم ديفيد كنجسلي (David Kingsley)، معهد هوارد هيوز الطبي وجامعة ستانفورد (رسم جوش كليس).

مفاتيح مدولية لبناء حيوانات مدولية:
المنطق الدقيق لجعل الأجزاء المكرّرة مختلفة

مع شعور بالرضى حول فهمنا لكيفية عمل المفاتيح الجينية، دعنا نحاول وضعها في سياق النزعات الكبرى في تصميم الحيوان، ولنحاول أيضا البدء في التفكير في كيفية تطوّر الحيوان. إن السمة الأساسية التي تسم الحيوانات الكبيرة والمعقّدة مثل الفقاريات والمفصليات هي بناؤها المدولي المكوّن من أجزاء مكرّرة، وفهم كيفية توظيف المفاتيح في تحويل الأجزاء المكرّرة إلى أشكال مختلفة بوظائف متغايرة أمر جوهري لفهم صناعة وتطوّر الحيوان.

لقد عرفنا في الفصل السابق أن نشاط جينات *Hox* المختلفة يحدث في الفصوص والزوائد المختلفة في المفصليات والقُسيمات المعيّنية والجُسيدات المختلفة في الفقاريات. ونمط ووظيفة كل جزء مكرّر يعتمد على جين *Hox* الفريد أو توافقية جينات *Hox* التي تعمل في كل فص أو زائدة أو جسيدة أو قسيم معيّني. يعتبر إنشاء «مناطق *Hox* (zones) والفعل الناتج عنها في نحت أشكال مختلفة لأجزاء مكرّرة المنطق الجيني الأساسي الذي تبنى عليه الأشكال المدولية للحيوانات الكبيرة الثنائية الجانب.

يعتمد المنطق الجيني على المفاتيح في مستويين اثنين. مجموعة المفاتيح الموجودة في جينات *Hox* ذاتها، حيث تفعِّل هذه المفاتيح كل جين *Hox* في مختلف المناطق التي ستتحول إلى المداول المختلفة للجسم. وتحتوي مجموعة أخرى من المفاتيح متواليات توقيعية تتعرف عليها بروتينات *Hox* وتتحكّم في الكيفية التي تُنشّط بها الجينات الأخرى في المداول المختلفة.

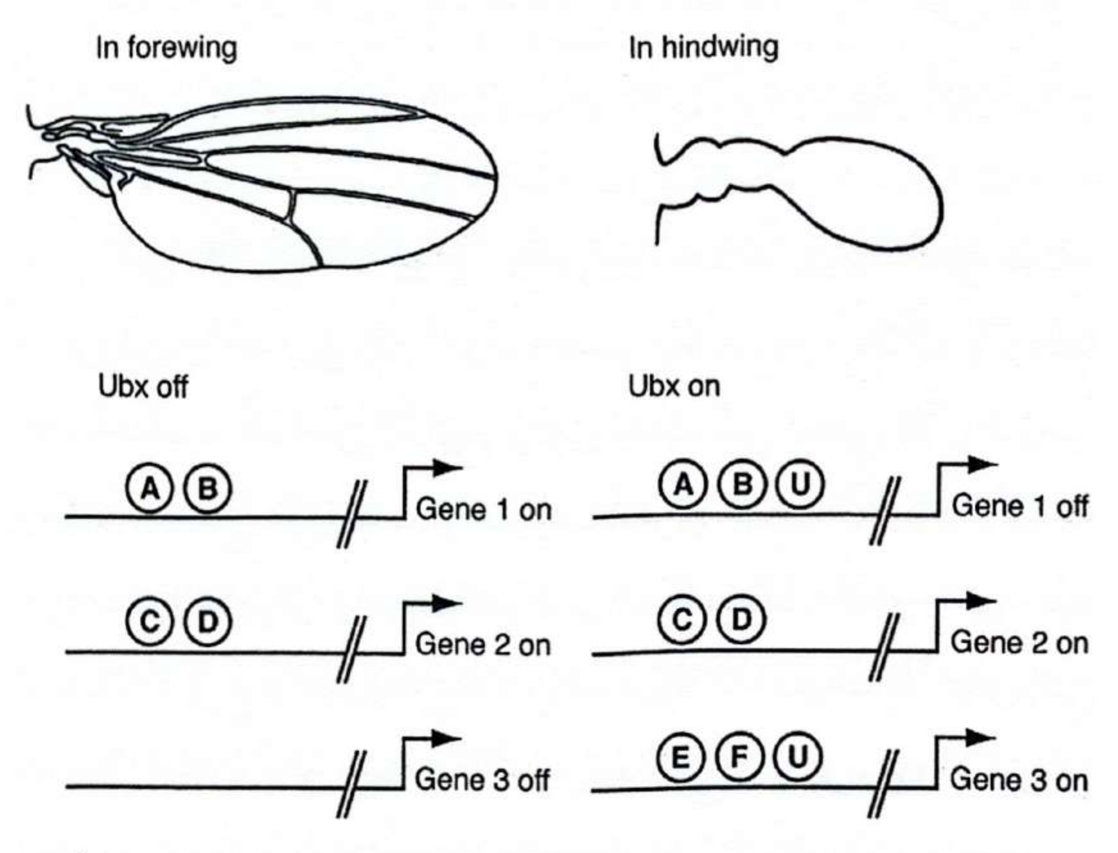
تنتشر جينات *Hox* على طول محور الجسم الرئيسي في المفصليات والفقاريات. وتتحكم المفاتيح الجينية في المناطق المتمايزة لنطاق نشاط كل جين نحت، فهناك مفاتيح مختلفة تتحكّم في أنماط جينات *Hox* في الأنسجة المختلفة مثل الدماغ الخلفي والأنبوب العصبي والجسيدات وبراعم الطرف في الفقاريات والبشرة والحبل العصبي في المفصليات. وبسبب المنطق الجيني لهذه المفاتيح تُنَشِّطُ الخلايا التي تنتمي لمدول معين بروتينات *Hox* مختلفة أو توافقيات مختلفة من بروتينات *Hox* عن تلك التي تُنشَّط في المداول المجاورة. فالشكل المختلف لكل مدول -القُسيم

المعيّني في الدماغ أو الجسيدات أو فصوص المفصليات أو الزوائد -يُنحت بواسطة جينات *Hox* تتحكم في جينات أخرى.

يمكن شرح المنطق العام للكيفية التي تنحت بها بروتيناتُ *Hox* التكويناتِ (morphologies) المختلفة للأجزاء المكرّرة من خلال الحشرات بسهولة. تُنمَّط أغلب الفصوص على طول المحور الرئيسي تنميطاً متغايراً وتحوي بنى متغايرة أيضاً. على سبيل المثال، لا يحمل الفص الصدري الأول أية أجنحة بينما يحمل الفص الصدري الثاني الأجنحة الأمامية الكبيرة والفص الصدري الثالث الأجنحةَ الخلفية الأصغر المستخدمة في التوازن. ولا يُنشَّط أي بروتين *Hox* في خلايا الجناح الأمامي لكن جميع خلايا الجناح الخلفي تنشط جين *UBx* (لأن مجموعة من المفاتيح في جين *UBx* تفعِّله في الفص الصدري الثالث والجناح الخلفي). وبالتالي فإن اختلاف المظهر بين الجناحين الأمامي والخلفي هو صنيعة جين *UBx*.

ينحت UBx شكل الجناح الخلفي عبر التأثير على مفاتيح الجينات التي تنمّط الأجنحة، فيكبح الجينات التي تعزّز تكوين سمات الجناح الأمامي (العروق والبنى الأخرى) ويشغّل الجينات التي تعزّز سمات الجناح الخلفي. يجب على المفاتيح في هذه الجينات دمج عدة مدخلات (واحتواء متوالية توقيعية لكل مدخلة). وإذا التقطتنا صورتين ضوئيتين لذات المجموعة من المفاتيح والنشاط الجيني المسؤولة عنه في الجناحين الخلفي والأمامي وقارنا بينهما، فإن المنطق الأساسي الذي نجده هو أن UBx يتحكم في مجموعة فرعية من المفاتيح لتشكيل الجناح الخلفي بحيث يبدو مختلفاً عن الجناح الأمامي (الشكل 5 ,6).

والمنطق ذاته يسري على صناعة القُسيمات المعيّنية المختلفة، والأنواع المختلفة من الأطراف في المفصليات، والأنواع المختلفة من الفقرات والأضلاع. إن الأشكال النهائية المختلفة من هذه البنى المكرّرة تسلسلياً تُنحت بواسطة بروتينات *Hox* تحدّد أي مجموعة جزئية من جينات تنميط الطرف أو القُسيم المعيّني أو الفقرة أو الضلع ستُفعَّل في كل موقع من المواقع على طول محور الجسد الرئيسي.



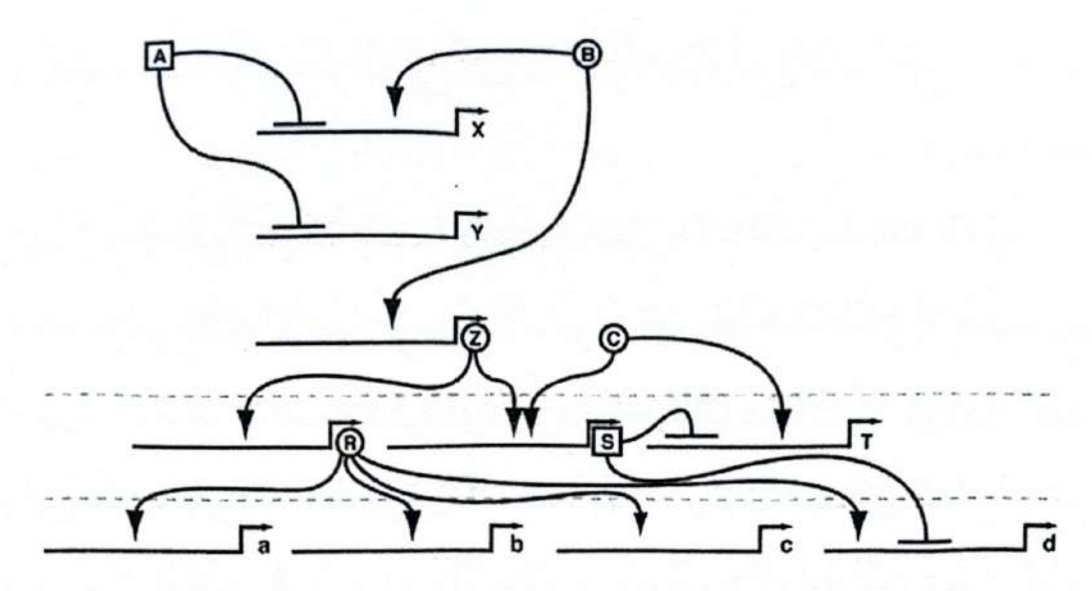
الشكل 6,5 **يتحكم بروتين *Hox* في الحالات المتغايرة للنشاط الجيني في الجناحين الأمامي والخلفي.** تمثل الخطوط المتواصلة المفاتيح بينما تمثل الأحرف بروتينات التحكم المختلفة (U هو اليوبكس). الأشكال المختلفة للجناحين تنتج عن المجموعات المختلفة من الجينات التي تنشط في كل منها (رسم جوش كليس).

«التوصيلات» في الجنين:

المفاتيح والدارات والشبكات

لقد شرحت طريقة عمل المفاتيح الجينية عبر التركيز على مفتاح واحد في جين محدد أو عدة مفاتيح في جين واحد أو تشكيلة مفاتيح يتحكم بها بروتين مشترك. لكن كل مفتاح أو بروتين وصفته وكل نمط عرضته هو مجرد صورة ساكنة، تضاف إلى الصور القليلة نسبياً في المسار الكلي لنمو حيوان ما. إن القصة الكاملة لصناعة حيوان تحوي صوراً كثيرة جداً، إنه فيلم كامل يضج بالحركة والمؤثرات دون لحظة توقف واحدة.

لم تكن الأشكال الحيوانية وأجزاؤها مطلقاً نتيجة عمل مفتاح أو بروتين واحد، بل إن أجزاء الجسم والأنسجة والخلايا بأنواعها نتاج أعداد ضخمة من المفاتيح والبروتينات التي تعضي الأنماط زمنياً ومكانياً، ونتاج بروتينات وجزيئات أخرى تمنح الخلايا والأنسجة خواصها الفيزيولوجية والميكانيكية. إن خطوات النموّ التي تنفذ بواسطة المفاتيح والبروتينات المفردة موصولة بالخطوات الأخرى التي تنفذها الجينات والبروتينات الأخرى، وتصنع المجموعات الأكبر من المفاتيح والبروتينات «دارات» (circuits) محلية تشكّل بدورها جزءاً من «الشبكات» التي تتحكم في نموّ البنى المعقدة. فمعمار الحيوان هو نتاج معمار شبكات تحكم جيني.



الشكل 7,5 **رسم بياني للتوصيلات الجينية للمنطق التنظيمي.** الحرف المحاط بدائرة هو مفعّل، والحرف المحاط بمربع هو كاظم، وهما يؤثران في المفتاح الذي تمثله الخطوط المتواصلة، الأسهم تمثل تأثير التفعيل بينما الخطوط التي تنتهي بقطع متعامدة عليها تمثل تأثير الكظم، تشترك في العادة طبقات من المفعّلات والكواظم في بناء وتنميط أي بنية (رسم جوس كليس).

إن منطق أو توصيلات (wiring) الدارات والشبكات يمكن أن يوضح باستخدام النوع ذاته من الرسوم البيانية المستخدمة للدارات الكهربائية أو المسائل المنطقية. كل مفتاح هو نقطة قرار (decision point) أو عقدة واحدة في الدارة الجينية. يوضح الشكل 7,5 مجموعة من الدارات المترابطة التي تحوي عدداً صغيراً من المفعّلات والكواظم والمفاتيح والجينات. ومرة أخرى لا يمثل هذا النموذج سوى قطعة صغيرة من الصورة الكلية. أكاد أخمن أنني سأحتاج إلى ألف صفحة لكتابة المنطق الكامل لصناعة ذبابة، وبضعة آلاف صفحة لتحبير القصة الجينية الكاملة لصناعة إنسان. فالشبكات التنظيمية أكبر بكثير في الفقاريات (حيث نمتلك ثلاثة أضعاف أنواع الخلايا مقارنة بالذباب أو

اللافقاريات) لكنها في الواقع ليست أكثر تعقيداً من الذبابة.

المفاتيح وحل مفارقة عدة الأدوات

لا يزال علماء الأحياء في بداية مشوار فهم الأهمية الكبيرة للمفاتيح الجينية. لقد تمكنا منذ عدة عقود من قراءة الشفرة الجينية ورؤية كيف وأين تشفر متواليات البروتين في الدنا بدقة. وكان التصوّر العام الناتج عن هذا المنظور المتمركز حول البروتين هو أن الجينات هي قطع المعلومات داخل ذلك الامتداد الواسع للدنا، وكل ذلك الحيّز حول الجينات وفيما بينها يخلو من المعلومات إلى حدّ كبير. وكان من المتعارف عليه أيضاً أن الفروقات بين الحيوانات تعود على العموم إلى تغيّرات في عدد الجينات ومتوالياتها. لكننا بدأنا نفهم الآن أن الجين يمكن أن يكون محاطاً بعدد من المفاتيح الجينية، وأظهرت لنا سَلْسَلة الجينوم أن الفئران والبشر يتطابقون تقريباً في عدد ونوع الجينات (25,000 في كلٍ منهما)، وهكذا مع فهمنا أن متواليات التشفير متشابهة جداً، فإن الوقت قد حان لاستكشاف المفاتيح المحيطة بها لفهم أدوارها في عملية التطور.

تُعِدُّنا هذه اللمحات الخاطفة عن منطق المفاتيح الجينية وإمكانيات تنوّعها العظيمة لبدء التفكير في مقدار مساهمتها في عملية تطوّر التنوّع الحيواني. إن المفارقة الكبيرة التي أثارها اكتشاف وجود مجموعات متشابهة من جينات عدّة الأدوات في حيوانات متباينة هي كيف يمكن للجينات ذاتها أن تستخدم في بناء مثل هذه الأشكال المختلفة؟ ولعل اكتشاف صفوف من المفاتيح التي تمكّن جينات عدة الأدوات من أن تستخدم ويعاد استخدامها مراراً في الحيوان الواحد، وأن تستخدم

بطرق متغايرة قليلاً أو كثيراً في البنى المكرّرة تسلسلياً هو مفتاح حل هذه المفارقة.

إنها قفزة صغيرة تلك التي ننتقل بها من فهم كيفية تحكم المفاتيح بالنمو إلى توقّع الكيفية التي صاغت بها التطوّر. تسمح *المفاتيح باستخدام جينات عدة الأدوات ذاتها بطرق مختلفة في الحيوانات المختلفة*، ولأن المفاتيح المفردة وحدات معالجة مستقلة للمعلومات، فإن التغيّرات التطوّرية في مفتاح واحد لجين من عدة الأدوات أو في مفتاح يتحكّم به بروتين من عدة الأدوات يمكن أن تؤدي إلى تغيّر نموّ إحدى البنى أو الأنماط دون أن يؤثر ذلك على البنى أو الأنماط الأخرى. هذا هو مفتاح فهم تطوّر الأجسام المدولية وأجزائها. كيف يمكننا، على سبيل المثال، أن نطور الإبهام المقابلة لبقية الأصابع أو كيف تطوّر الذبابة جناحاً خلفياً خاصاً. سأستكشف العديد من الألغاز التطوّرية في القسم الثاني من الكتاب؛ من الانفجار العظيم للتنوّع في الأشكال الحيوانية الذي يسم الانفجار الكامبري إلى التفاوت الخلاب في الفراشات والثدييات التي تعيش حالياً، لقد صيغت جميعها بواسطة تغيّرات تطوّرية في المفاتيح الجينية.

القسم الثاني

الأحافير والجينات وصناعة التنوّع الحيواني

ظل علماء الأحياء الجزيئية (علماء المختبرات المغلقة المشتغلون على الدنا، مثلي) وعلماء الأحافير (palaeontologists) (علماء الحقول المفتوحة الذين يسافرون إلى أماكن غريبة ويستخرجون الكنوز القديمة من الصخور) غرباء تماماً عن بعضهم بعضاً عقوداً من الزمن. وبغياب أي شيء مشتركٍ لم يحدث بيننا لقاء، فضلاً عن المواعدة؛ كنا نخضع لتدريب مختلف، ونعمل عادة في أقسام جامعية مختلفة كلياً، وننشر في مجلات علمية مختلفة.

كل ذلك تغيّر الآن. فعلماء الأحافير يتحدثون عن جينات *Hox*، وعلماء الأحياء الجزئية صاروا يتجرؤون على إدخال كلمة «كامبري» في جملة مفيدة!

سأروي لكم في القسم الثاني من الكتاب قصة لمّ الشمل السعيدة بين علماء الأجنة وعلماء التطوّر لحل الألغاز المحيطة بتطوّر الأشكال الحيوانية. يعود سبب لمّ الشمل في جزء كبير منه إلى التقنيات العالية لعلم الأحياء الجزيئية التي وفّرت طريقة جديدة كلياً للنظر في نمو الحيوان وتاريخه. فقد سمحت لنا معارفنا حول جينومات الحيوانات الحية وعمليات نموّ الأجنّة بالنظر إلى تاريخ الحيوان كما ترسمه السجلات الأحفورية من منظور جديد، ومنحتنا نظرات ثاقبة لا لرؤية ما حدث فقط، بل كيف حدث أيضًا، ووفرت لنا فهم الأعمال الداخلية التي أدت إلى صناعة التنوّع الحيواني. إن أحد المعتقدات الأساسية في علم الجيولوجيا الحديث هو أن «الحاضر مفتاح فهم الماضي». وذلك يعني أن العمليات التي نستطيع مشاهدتها الآن وجدت في الماضي ومن خلالها نستطيع تفسيره. هذه الفكرة الأولية هي أيضاً أحد المبادئ الرئيسية في

علم الإيفو ديفو الجديد.

لقد هيّأ القسم الأول من هذا الكتاب المسرح عبر شرح أربعة أفكار رئيسية حول نموّ الحيوان: مدولية المعمار الحيواني، وعُدة الأدوات الجينية لبناء الحيوانات، وجغرافيا الجنين، والمفاتيح الجينية التي تحدّد إحداثيات عمل عُدة الأدوات الجينية في الجنين.

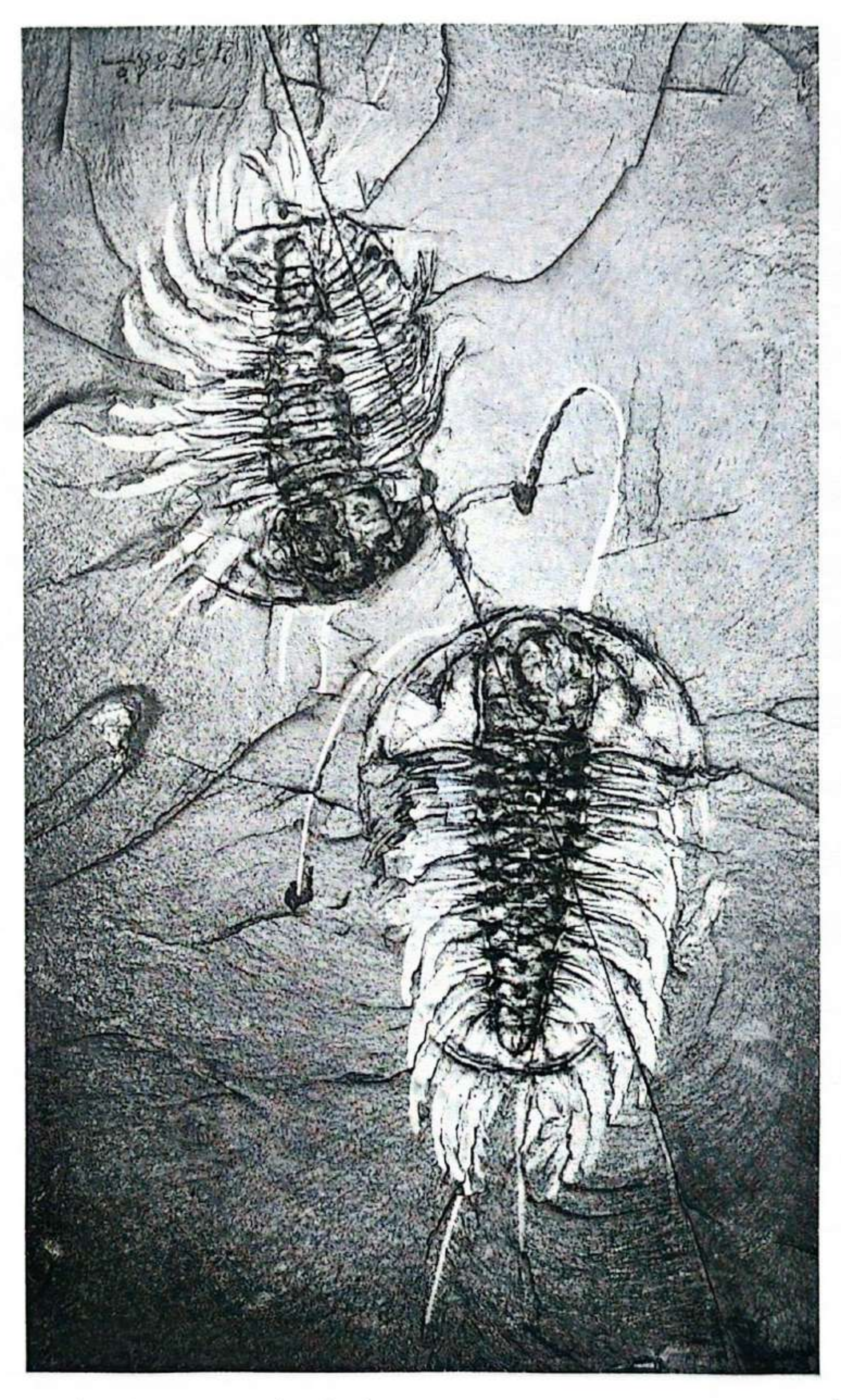
الفكرة المركزية في القسم الثاني من الكتاب هي أن الأشكال الحيوانية تتطوّر من خلال التغيّرات في جغرافيا الجنين. سنتعلم تفاصيل الكيفية التي تتطوّر بها الجغرافيا والشكل من خلال تغيّر الطريقة التي تستخدم فيها جينات عدة الأدوات. إن تطوّر الشكل في الأغلب هو مسألة تعليم الجينات الغابرة حيلاً جديدة.

سنكتشف خلال الفصول القادمة الإمكانات التي يوفرها علم الإيفوديفو لإبصار الماضي البعيد لمساعدتنا في رسم صور الأسلاف المنقرضة منذ عصور سحيقة. ولإلقاء الضوء على بعض أكثر الأحداث دراماتيكية في تاريخ الحيوان، سنتفحص التطوّر منذ الجذور الأولى للمملكة الحيوانية والتي ظهرت أولاً في البحار الغابرة قبل أكثر من 500 مليون سنة، إلى أصول البنى الحديثة التي سمحت للأنواع الجديدة من الحيوانات بالحياة على سطح اليابسة أو في الجو، وإلى الفروع الأحدث في الشجرة الحيوانية التي صنعت التنوّع المذهل لحيوانات اليوم. وهذا يبني الإطار العام لاستكشاف الكيفية التي تطوّرنا بها نحن البشر من سلف من النسّانين الكبار رباعيي الأطراف ذوي الأدمغة الصغيرة.

سترسم القصص التي سأرويها صورة جديدة واضحة للعملية التطوّرية. إن تأثير علم الإيفوديفو ينبع من بَكارَته ومن نوعية الأدلة

غير المسبوقة التي يوفرها. بعض هذه الأدلة الجديدة يَحسم بشكل قاطع مناظرات طويلة في علم الأحياء التطوّرية، وبعضها يثير أفكاراً جديدة كلياً، فيما تميط بعض كشوفاته اللثام عن أحد أكبر ألغاز علم الأحياء التطوّرية؛ وهو التحديد الدقيق للتغيّرات الجينية المسؤولة عن تطوّر أنواع حيوانية معينة.

ولأن علم الأجنة، من خلال الإيفوديفو، يشارك في تسنّم أدوار البطولة في النظرية التركيبية التطوّرية المتكاملة، فقد آن الأوان لتغيير المناهج الدراسية لتعكس هذه الثورة. إنني أعتقد فعلاً أن منهج الإيفوديفو في توضيح كيفية تطوّر الشكل يقدم رؤية تفسيرية أكثر فعالية بكثير من الاستقراءات المجردة التي قدمتها حقبة النظرية التركيبية الحديثة. إنه يضيف إلى قصص التطوّر الكلاسيكي حول الانتخاب الطبيعي في طيور جالاباجوس والعثّ المفلفل (peppered moths) أفكاراً عميقة عن سرطان البحر والقريدس (الروبيان) والعناكب والأفاعي والفراشات المبقعة والفئران الجيبية والنمر الأمريكي، ويشرح -كما لم يُشرح من قبل -كيف صنعت وتصنع «أشكال داروين اللانهائية».



أولينويد المنشاري (*Olenoides serratus*) الثلاثي الفصوص في سجّيل بيرجس.
(تصوير تشيب كلارك، بإذن من مؤسسة سميثسونيان).

الفصل 6

الانفجار العظيم لتطوّر الحيوان

«يبدو أن الطبيعة تتلذّذ بتنويع استخدام الآلية ذاتها بعدد لانهائي من الطرق... إنها تهجر نوعاً معيناً من الإنتاج فقط بعد أن تستخدم جميع أشكاله الممكنة في مضاعفة الأفراد»

دينيس ديدرو (Denis Diderot)
Pensées sur l'Interpretation—
(1753) de la Nature

في مدخل قاعة عرض الأحافير بمتحف سميثسونيان الوطني للتاريخ الطبيعي بالعاصمة واشنطن، توجد مجموعة من الخزائن المصنوعة من زجاج عادي باللون الأخضر المائل إلى الرمادي. يتجه أغلب الزوار نحوها منجذبين إلى رسومات الديناصورات والوحوش الضخمة الأخرى إلى جوارها. غير أنه توجد داخل تلك الخزائن

الـمُغفلة قطع صغيرة من الصخور تقبع فيها بعض أكثر الأحافير الحيوانية التي اكتشفت حتى الآن أهميةً واستثنائيةً.

إنها أحافير سجيل بيرجس التي اكتشفها أولاً تشارلز والكوت (Charles Walcott) أمين متحف سميثسونيان في حملة استكشافية إلى كولومبيا البريطانية في العام 1909. ترجع هذه الأحافير إلى العصر الكامبري الأوسط، قبل نحو 505 ملايين سنة. وقد أسَرَت هذه الأشكال المدهشة والغريبة المحفوظة في السجيل الرمادي القاتم علماء الأحافير مدّة طويلة من الزمن. فهي من أقدم الحيوانات المعقدة التي تمتلك قرون استشعار وأطرافاً وذيولاً وأعيناً، وتشمل ممثلين للعديد من المجموعات الحيوانية الحديثة مثل المفصليات والحلقيات (annelids) والحبليات (chordates) والرخويات (molluscs). ويبدو أنها اندفعت إلى مسرح الحياة في فترة قصيرة نسبياً، حوالي 15–20 مليون سنة، وقبلها لم توجد سوى أمثلة قليلة على الحياة الحيوانية في السجل الأحفوري. حُفظ هذا الظهور الجيولوجي السريع للأشكال المعقدة في صخور يصل عمرها إلى ما بين 525–505 مليون سنة موجودة في أنحاء العالم، وعرف ذلك بالانفجار الكامبري أو الانفجار العظيم للتطوّر الحيواني.

كان أول من جذب الانتباه العام الواسع لظاهرة الانفجار الكامبري والأحافير الحيوانية هو الراحل ستيفن جاي جود من خلال كتابه الرائع *Wonderful Life* [**حياة مدهشة**]. وكان من أوائل التحديات التي قدمتها الأحافير الكامبرية تحديد المجموعات الحيوانية التي تنتمي إليها هذه الأحافير. لقد قاد تشريحها الجسماني الغريب (من وجهة النظر الحديثة) إلى عدة آراء مختلفة ومتغيّرة حول ما إذا كان الأحفور المدروس رخوياً

أو دودة، مفصليًا أو غير مفصلي، أو أنه حيوان آخر مختلف تماماً عما نعرفه من الحيوانات المعاصرة.

إن العلاقة بين هذه الحيوانات الأحفورية والمجموعات الحيوانية المعروفة ليست إلا إحدى الأحجيات العديدة المحيطة بالانفجار الكامبري التي تتضمن أيضًا: ما الذي أشعل هذا الانفجار؟ لماذا ظهرت حيوانات كبيرة ومعقدة في هذا الوقت أصلاً؟ لماذا نجحت هذه الأشكال الحيوانية تحديداً؟ وُضعت العديد من الأفكار لتفسير هذا الانفجار؛ حيث ركزت بعض النظريات على التفسيرات الخارجية مثل تغيّر المناخ الأرضي، بينما ركزت نظريات أخرى على الأسباب الداخلية مثل ظهور جينات بناء الجسم. وككل الأحداث التي تقع في الماضي السحيق يسهل التكهّن بالأفكار ويصعب اختبارها. ومع احترامي الشديد للنظريات الجينية؛ كيف يمكن للمرء أن يطرح أسئلة حول جينات حيوانات ماتت منذ أكثر من 500 مليون سنة؟ إن الأحافير الكامبرية ليست حيوانات حقيقية بل هي مجرد بصمات حيوانات دُمغت تحت قوى جيولوجية هائلة، لكن التقدّم الدراماتيكي لعلم الأجنة مكنّنا من فهم الأدوار التي لعبتها الجينات في إشعال فتيل الانفجار الكامبري وتوسيعه. إن الإمكانيات الجديدة لعلم الإيفوديفو قادرة، بمعنى ما، على بعث هذه الأشكال البائدة إلى الحياة.

يقدم لنا علم الإيفوديفو فكرة مفاجئة مفادها أن جميع جينات بناء أجسام الحيوانات الكبيرة والمعقّدة تسبق بكثير ظهور هذه الأجسام في الانفجار الكامبري. وقد وجدت هذه الجينات قبل 50 مليون سنة على الأقل، أو ربما أكثر قليلاً من ظهور الأشكال الكبيرة والمعقدة، وهذا

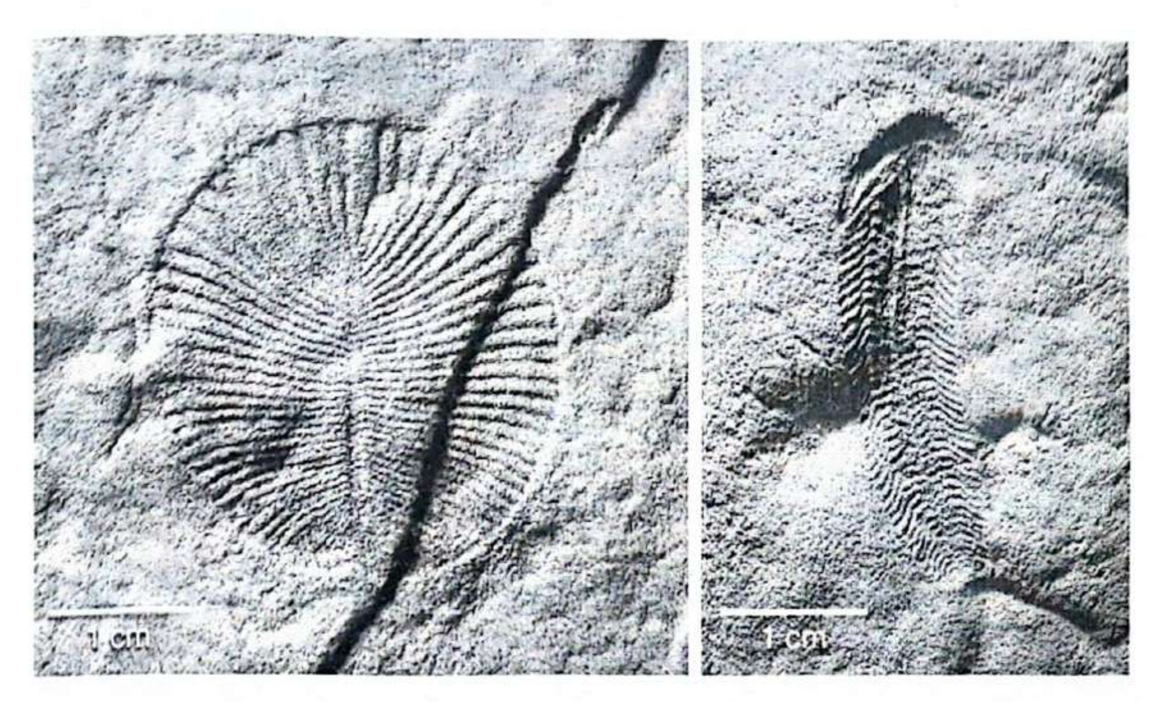
يعني أنه في حين أن عُدّة الأدوات الجينية لم تتطوّر إلا أن الظهور السريع لأشكال الأجسام والتغيّرات التي طرأت عليها تخبرنا أن النموّ الحيواني قد خضع لتطوّر مذهل.

إن قصة العديد من المجموعات الكامبرية تتلخّص في تطوير عددٍ وأنواعٍ مختلفة من أجزاء الجسم المكرّرة. وهذا العرض الإيضاحي لقانونِ ويليستون يُفسر بالتغيّرات في جغرافيا الجنين. فمسؤولية صناعة هذه الأشكال الجسدية المختلفة تعود للتغيّرات الطارئة على إحداثيات جينات عدة الأدوات وتحديداً حيث تنشّط جينات *Hox* في الجنين. وهذه التغيّرات تحدث بواسطة المفاتيح الجينية، وقد قاد تطوّر المفاتيح الجينية الحدثَ الكامبري والتطوّر اللاحق للصفوف الرئيسية في المملكة الحيوانية التي ظهرت فيما بعد.

سيكون مبحثنا الرئيسي والمركزي في هذا الفصل هو كيف تطوّرت الأشكال المختلفة، لكن من أجل إعداد المسرح للهدف تلزمنا معرفة ما حدث فعلاً في التاريخ الحيواني، ماذا كان قبل الانفجار؟ وما الذي تمخّض عنه؟ وما الذي حدث بعد ذلك؟ سأبدأ بسؤال ما الأشكال التي كانت موجودة قبل الانفجار الكامبري؟ وبالرغم من ندرة السجل الأحفوري السابق للانفجار الكامبري إلا أن علم الإيفوديفو يمكّننا من النظر أعمق في تاريخ الحيوان قبل العصر الكامبري بُغية تأمّل أشكال أسلاف الحيوانات الكامبرية وتعقيداتها، وخاصة السلف المشترك الأخير الغامض لجميع الحيوانات الثنائية الجانب (bilateral)، ونحن البشر.

بناء لغز: الحيوانات قبل الانفجار العظيم

يبلغ عمر الأرض 4,5 مليار سنة. وربما بدأت الحياة بالتطوّر باكراً قبل 3,5 مليار سنة، لكن خلال الثلاثة مليارات سنة الأولى كانت المتعضّيات صغيرة عموماً (بمقياس مليمترات أو أصغر) وكان بناؤها بسيطاً. وظهرت ممالك حيّة عدّة قبل ظهور مملكتنا: البكتيريا والبدئيات والطلائعيات والفطريات (ظهرت نباتات اليابسة بعد الحيوانات لكن سلفها، الطحالب الخضراء، سبق الحيوانات). وفي نهايات الأمد ما قبل الكامبري، قبل حوالي 600 إلى 570 مليون سنة، بدأت هيئة الحياة وحجمها بالتوسّع وظهرت أشكال بحجم عدة سنتيمترات أطلق عليها اسم حيوانات إدياكاران (Ediacaran fauna) (سميت باسم هضاب في جنوب أستراليا حيث اكتُشفت هذه الأشكال لأول مرة). لقد حيّرت هذه المجموعة الغامضة علماء الأحافير عدة عقود، وشبّه آندي نول (Andy Knoll)، عالم الأحياء في هارفرد، اختلاف الآراء حولها باختبار رورشاخ (Rorschach test) أحفوري. فقد تم التأكيد على أن أحافير إدياكاران، ذات الشكل الأنبوبي والسعفي والمتناظرة شعاعياً، هي أي شيء بدءاً بالأشكال التي صنعتها الترسّبات إلى تجربة منقرضة للحياة متعدّدة الخلايا إلى أسلاف الحيوانات أو أفراد المجموعات الحيوانية الحيّة، إلا أن صلتها بالحيوانات الحيّة ظلت جدلية ومشكوكاً فيها (الشكل 1,6). لكن مهما بلغت غرابة الإدياكاران فإن أسلاف الحيوانات الكامبرية يجب أن تكون موجودة في الوقت ذاته. ورغم أننا لا نعرف كيف يبدو شكلها إلا أن علم الإيفوديفو يمكّننا من تخيل ما نبحث عنه.



الشكل 1,6 **أشكال إدياكاران.** ديكنسونيا كوستاتالا *(Dickinsonia costatala)* وسبريجينا فلوندرز *(Spriggina flounders)* من جبال إدياكاران في جنوب أستراليا ذات صلة غير مؤكّدة بالأشكال الحديثة أو الكامبرية (الصورتان تقدمة د. جيم جلنج (Jim Gehling)، متحف جنوب أستراليا، استخدمت بإذن مسبق).

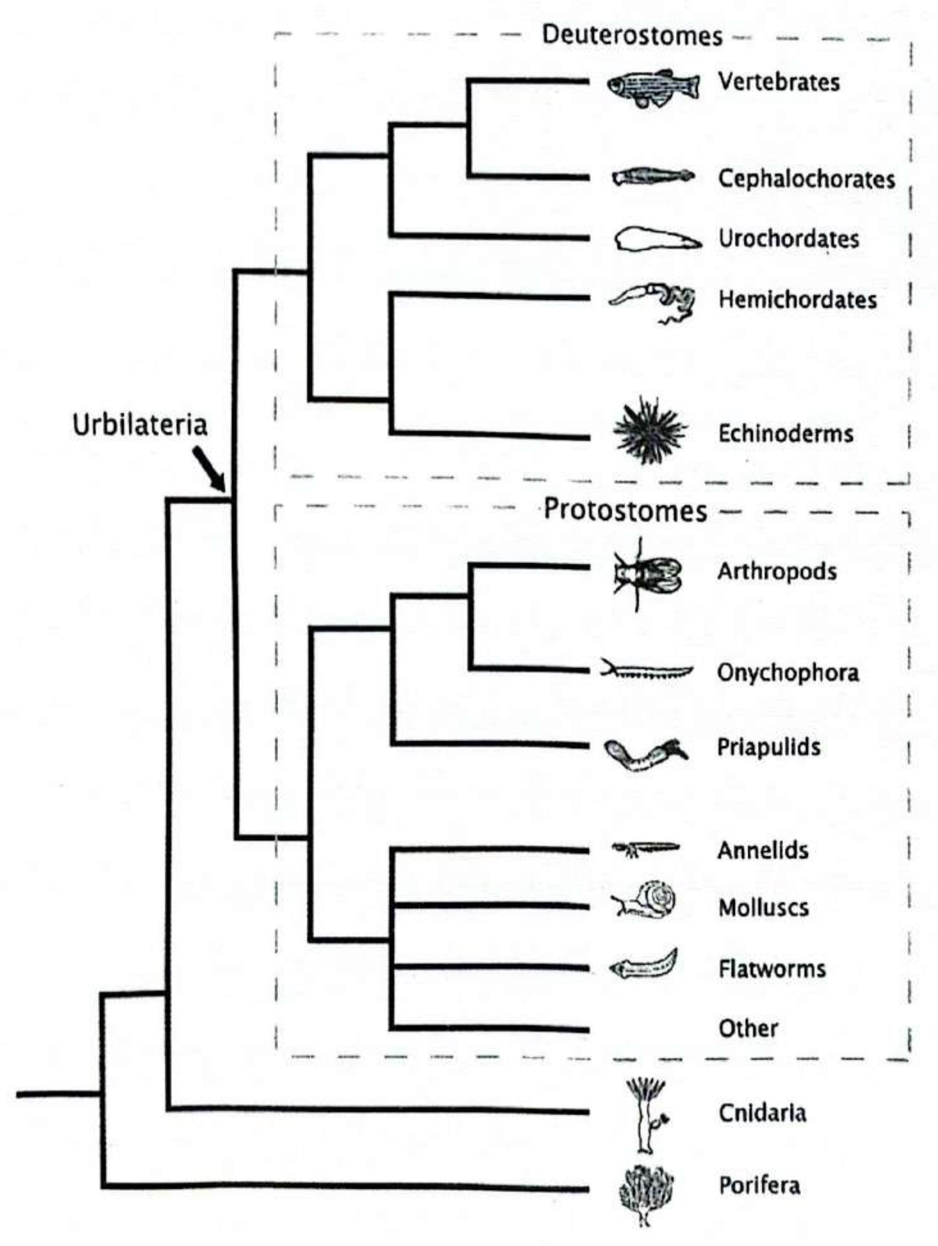
لبسط التفكير حول أسلافنا يجب أن نمارس نوعاً من الاستدلال القائم على بنية شجرة التطوّر الحيواني (الشكل 2,6). يهتم علماء الأحياء بموقع المجموعات في شجرة التطوّر لأن معرفة العلاقات تسمح لنا باستنتاج وقت تطوّر خاصية ما، وفي أي المجموعات تطوّرت. وتمثل الحشرات والفقاريات فرعين رئيسيين مختلفين في شجرة التطوّر. ويتمايز هذان الغصنان فيما بينهما بوجود فرق أساسي بين أجنّتهما، وهو موقع تشكّل الفم بالنسبة لفتحة مسمّ الأريمة الأولية. الحيوانات التي يتشكّل فيها الفم من موقع منفصل عن مسمّ الأريمة في الجنين تعرف بثنائيّات الفم (deuterostomes)، وهذا الصنف يشملنا نحن البشر وجميع الفقاريات، بالإضافة إلى شوكيات الجلد (echinoderms) (مثل

قنافد البحر ودولارات الرمل)، كما يشمل عدة مجموعات أخرى. أما التي ينمو فيها الفم من مسمّ الأريمة فتعرف مسمّيات الفم (protostomes) ويشمل ذلك الذباب والمفصليات عموماً كما يشمل الحلقيات والرخويات ومجموعات أخرى من الحيوانات. يحوي جذع الشجرة الحيوانية أيضاً الإسفنجيات واللاسعات (cnidarians) مثل (قنديل البحر والمرجان وشقائق البحر (sea anemones)) والمشطيّات (comb jellies) التي انفصلت قبل ظهور مسمّيات الفم وثنائيات الفم (هذه الحيوانات مهمة في تاريخ الحياة وفي الحياة البحرية اليوم، لكنني لن أنفق عليها الكثير من الوقت في هذا الكتاب، فما يهمني هو الفرعان أعلى الشجرة).

كان الظهور الأول لفرد واضح ومميّز من مجموعات مسمّيات الفم وثنائيات الفم العديدة في العصر الكامبري. ولأن فروع هذه المجموعات في الشجرة الحيوانية واضحة ومتمايزة في هذه الفترة نستنتج أن أسلافها المشتركة يجب أن تسبق الحقبة الكامبرية بفترة من الزمن. ويعتبر هذا استدلالاً لأن سجل مسمّيات الفم وثنائيات الفم الأحفوري قبل العصر الكامبري شحيح جداً. وفي الحقيقة فإن هناك حيواناً أحفورياً واحداً قبل كامبري يعرف باسم كيمبريلا (*Kimberella*) ويرجع إلى ما قبل 555 مليون سنة ويُقترح أنه يمثل مسمّيات الفم.

إذاً أين هي هذه الأسلاف؟ كانت ظروف حفظ الأحافير كافية لحفظ حيوانات مثل قنديل البحر والمرجان والإسفنجيات تماماً مثلما حفظت حيوانات إدياكاران. لا يبدو أن السجل الأحفوري هو سبب هذا النقص. ولأن الأحافير الكبيرة لبعض المتعضّيات قد حفظت، فقد

طُرح تفسير مفاده أن فقدان أحافير مسمّيات الفم وثنائيات الفم يعود لكونها صغيرة (ربما أقل من سنتيميتر واحد) ورقيقة البناء، أما الاحتمال الآخر فهو أنها موجودة ضمن أحافير الإدياكاران المتفاوتة والغريبة لكننا لا نستطيع تمييزها بسبب عدم امتلاكها، في تلك المرحلة، خصائص



الشكل 2,6 **شجرة التطوّر الحيواني.** يُظهر الرسم المجموعتين الرئيسيتين لثنائيات الجانب، وهما مسمّيات الفم وثنائيات الفم، ويطلق على آخر سلف مشترك بينهما اسم ثنائي الجانب البدائي. كما تظهر اللاسعات (شقائق البحر والمرجان) والإسفنجيات وقد انفصلتا قبل ثنائيات الجانب (رسم جوش كليس).

الحيوانات الأحدث. ومن دون أحافير مؤكّدة سيظل علم الأحافير متردداً في التكهّن بأكثر من صورة ضبابية لكائن منعدم التفاصيل شبيه بالدودة لآخر سلف مشترك بين مسمّيات الفم وثنائيات الفم.

إذا كان سجل الأحافير لا يمنحنا العديد من الاستنتاجات المؤكّدة، فما الذي نستطيع قوله عن الأسلاف الحيوانية إن اعتمدنا على أدلة من نوع آخر؟ نستطيع ممارسة استدلال مبنيّ على ما تتقاسمه الأخلاف (descendants). وهذا هو المنطق النقدي الذي يستخدمه الإيفوديفو للنظر في الماضي البعيد. إن المقدمة المنطقية الأساسية هنا هي: ما تتشاركه مجموعتان أو أكثر يغلب أن يكون موجوداً في سلفها المشترك (الممثل في الرسم على هيئة شوكة في قاعدة كل فرعين في الشجرة)، ثم نستطيع بعدها تطبيق هذا المنطق على معرفتنا بالنموّ والتطوّر في مجموعتين أو أكثر للاستدلال على خصائص الأسلاف المشتركين. وأحد هذه الخصائص المؤكّدة هي أن السلف المشترك الأخير لمسمّيات وثنائيات الفم كان متناظر الجانبين. جميع أعضاء المجموعتين يمتلك، في إحدى مراحل حياته على الأقل، تعضية ثنائية الجانب (يرقات قنافذ البحر وسائر شوكيّات الجلد ذات تعضّ ثنائي الجانب بالرغم من أنها عند البلوغ تظهر أنواعاً مختلفة من التناظر الشعاعي). وهذا التعضّي يفتح الطريق لأساليب جديدة من الحركة والتنقل وأنماط حياة أكثر تعقيداً. لكننا نستطيع التقدّم أكثر الآن، فبناء على محتويات عدة الأدوات الجينية المشتركة وأدوارها المتشابهة في مسمّيات وثنائيات الفم، نستطيع الإضافة بكل ثقة أن سلف ثنائيات الجانب (الحيوان الذي أطلق عليه إدي روبرتيس (Eddy De Robertis) من جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس اسم *Urbilateria* والذي يعني

ثنائي الجانب البدائي) يمتلك عدة أدوات من ستة أو سبعة جينات *Hox* على الأقل بالإضافة إلى جينات *Pax-6*، و*Dll*، والرجل الصفيح *tinman*، وبضع مئات أو أكثر من جينات بناء الجسم.

من المثير للاهتمام مجرد التأمل في ما كان يفعله هذا العدد الكبير من الجينات في ثنائي الجانب البدائي، هل كان فعلاً حيواناً عديم الملامح يشبه الدودة؟ ما الذي يمكن أن تدلّ عليه حيازة عدد كبير من الجينات فيما يتعلق بالتعقيد التشريحي والسلوكي؟

من طرق تفسير الأدوار المتشابهة لجينات عُدّة الأدوات في الحيوانات المختلفة افتراض مستوى من التعقيد التشريحي في ثنائي الجانب البدائي تحكّمت فيه هذه الجينات. ورغم أن هذا المستوى مفتوح على تأويلات مختلفة، إلا أننا نستطيع بناء صورة لثنائي الجانب البدائي بناء على استدلالات معقول. هل يمكن أن يكون ثنائي الجانب البدائي ذا عينين؟ من المحتمل أنه امتلك عينين، لكنها ليست عينين واضحتين كبيرتين كتلك التي ظهرت لاحقاً عند ثلاثيات الفصوص في العصر الكامبري. ولو وُجد كائن يمتلك عينين كبيرتين معقدتين لظهر على الأرجح في السجل الأحفوري، لكن بما أن دور *Pax6* والجينات الأخرى في نموّ العين مشترك بين الفرعين الرئيسيين لثنائيات الجانب يمكننا استنتاج أن ثنائي الجانب البدائي ربما حاز على الأقل نوعاً من بقع العينين أو عضواً مستشعراً للضوء مركباً من خلايا حساسة للضوء مرتبة في شكل هندسي.

وباستخدام المنطق ذاته نستطيع التساؤل عما إذا كان لثنائي الجانب البدائي أطراف. يستطيع علماء الأحافير رصد آثار تعرّجات الحيوانات

الأحفورية لكن هذه التعرّجات لم تصبح ذات أهمية حتى الانفجار الكامبري، ولذلك لا يمكننا التحدّث عن أطراف مكتملة عند ثنائي الجانب البدائي، لكنه امتلك فعلاً جينات لبناء الأطراف. ونعرف أن هذه الجينات تستخدم لصناعة جميع أنواع الأشياء الخارجة من الجسم، ولذلك حتى لو لم يمشِ ثنائي الجانب البدائي أو يسبح فربما امتلك بنى خارجة من الجسم الرئيسي. ولعلها كانت أشياء تساعده على الاستكشاف (جهاز استشعار مثلاً) أو تناول الطعام (فم أو مجسّات tentacles). هذه الجينات التي استخدمت لصناعة النتوءات ستستخدم لاحقاً في العصر الكامبري لصناعة أطراف حقيقية للسباحة والمشي.

إذا كنا متأكدين من أن ثنائي الجانب البدائي امتلك جين *الرجل الصفيح*، فهل كان يمتلك قلباً؟ لا نتوقع قلباً حديثاً كالذي نمتلكه نحن، لكن ربما كانت مجموعة من الخلايا القادرة على الانقباض لضخ السوائل خلال الجسم. بالإضافة إلى ذلك فإن عدد جينات *Hox* المختلفة يوحي بأن جسم *Hox* البدائي تمايز على الأقل إلى مناطق أمامية ووسطية وخلفية. وباستخدام المنطق الجيني والنمائي نستطيع القول إنه امتلك قناة هضمية (throughgut) تمتد من الفم إلى الشرج، ونستطيع القول بثقة بوجود جميع أنواع الخلايا العضلية والعصبية والمنقبضة والحساسة للضوء والهضمية والإفرازية والبلعميّة (phagocytic) لأن هذه الخلايا موجودة في جميع الأخلاف. لكن غير المؤكد فيما يتعلق بثنائي الجانب البدائي هو درجة تعضّي وانتظام هذه الخلايا في أعضاء يمكن أن نسميها عيوناً أو قلوباً أو أطرافاً... إلخ. إلا أن التعضّي كان معقّداً بما فيه الكفاية لاحتجاز وظائف جينات *Pax-6*، و*Dll*، والرجل الصفيح ***tinman***،

و*Hox* وغيرها، في أدوار حفظت في أخلاف هذه الأسلاف أكثر من 500 مليون سنة.

يجب ألّا أبدو قطعياً فيما سردته، لأننا لا ولن نستطيع التيقّن من معرفتنا هذه إلى أن نجد الأحافير (البحث جارٍ في مواقع جديدة وفي مختلف أنواع الرواسب والتراكمات). لكن المخطط الجديد والمهم الذي يقدمه علم الإيفوديفو هو لحيوان مجهّز بكل الجينات الضرورية لبناء أجسام معقّدة ويمتلك مستوى مبدئياً من التعقيد التشريحي.

طرح دارون، في رسالة إلى عالم الجيولوجيا تشارلز لايل (Charles Lyell)، تأمّلاته حول أسلافنا مستقرئاً من المقارنة بين الفقاريات قائلاً: «إن سلفنا كان حيواناً يتنفس الماء وله مثانة هوائية وذيل سباحة عظيم وجمجمة ناقصة، وكان خنثى بلا أدنى شك! هذا نسب سار للجنس البشري». إن اكتشاف التشابهات الممتدة بين أغلب المملكة الحيوانية يسمح لنا برؤية لمحة أبعد في الزمن الماضي لكائن أقدم، كائن يجعل من سلف دارون يبدو معقداً تماماً.

كن فخوراً جداً بميراثك.

الانفجار الكامبري: كثير من المفصليات، قليل من الوقت

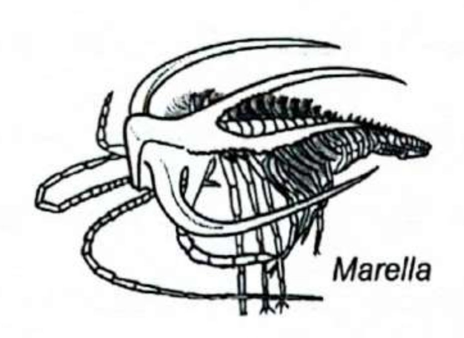
ترجع البداية الجيولوجية للعصر الكامبري إلى ما قبل 543±1 مليون سنة، لكن هذه البداية لا تعني أنها النقطة الحاسمة التي انفجر فيها التطور الحيواني. فقد ظهرت أشكال قليلة نسبياً في الـ 15 إلى 20 مليون سنة التالية في السجل الأحفوري قبل الظهور الحاسم للمفصليات أو

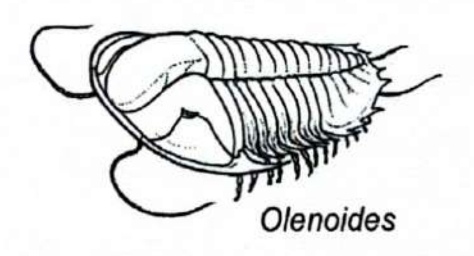
الحبليات أو شوكيات الجلد أو عضديّات الأرجل (brachiopods). ولأن هذه الأشكال متمايزة جداً عن بعضها بعضاً (يجب أن تكون مرتبةِ من أجل تصنيفها) فقد أُستنتج أن التنوّع في الخطوط الحيوانية العديدة كان جارياً منذ وقت طويل رغم غموض ذلك في السجل الأحفوري.

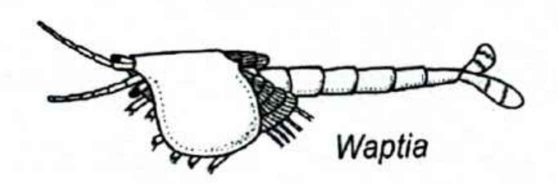
شبه سيمون كونواي موريس (Simon Conway Morris)، أحد روّاد علماء الأحافير الذين فكوا شفرة الأحداث الكامبرية، هذه المرحلة المبكرة في التنوّع بخط البارود الذي يأتي من الأزمنة الغابرة. مهما كان طول هذا الخط فإنه سيصل مع نهاية هذه المرحلة إلى برميل البارود مفجّراً تنوّع الأشكال. ولم يقتصر هذا على ظهور أفراد يمثلون المجموعات الرئيسية فقط بل كان موكباً من التفاوتات في أنواع الأجسام الأساسية. يحوي سجّيل بيرجس لوحده حوالي 140 نوعاً من الحيوانات تنتمي لأكثر من عشر شعب. وقد قدمت مواقع أخرى هبات إضافية، تحديداً موقع حيوانات تشينج يانج (Chengjiang) في مقاطعة يونان (Yunnan) الصينية حيث عُثر على عيّنات حفظت بشكل مذهل، ولعل الأهم حول هذا الموقع أنه يسبق سجّيل بيرجس بحوالي 15 مليون سنة. لقد ساعدتنا حيوانات تشينج يانج في دفع تاريخ ظهور عدة مجموعات إلى وقت أبكر. هذا الموقع النشط لا يفتأ عن تزويدنا بمكتشفات تثير الذهول بما في ذلك بعض الفقاريات المدهشة التي سأناقشها قريباً. كما أنه يوفّر أيضاً صورة مختلفة في فترة زمنية أخرى ومنطقة أخرى في العالم القديم لمقارنتها بالحياة الكامبرية. ويخبرنا موقعا بيرجس وتشينج يانج عن مجموعتين تنوّعتا بطريقة مذهلة هما: المفصليات وفصّيات الأقدام (lobopodians)، وهذه الأخيرة التي حصلت على اسمها بسبب أقدامها

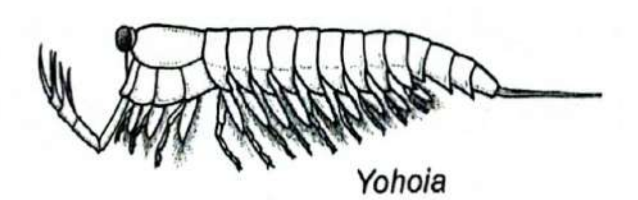
البسيطة اللامفصلية غير معروفة كثيراً، لكنها لعبت دوراً حاسماً في قصة المفصليات والحيوانات الكامبرية عموماً.

كانت المفصليات المجموعة المسيطرة بين الحيوانات الكامبرية. فثلث أنواع بيرجس الحيوانية أو أكثر من المفصليات. وتمتد من أشكال ثلاثيات الفصوص المألوفة مثل *الأولينويد المنشاري*







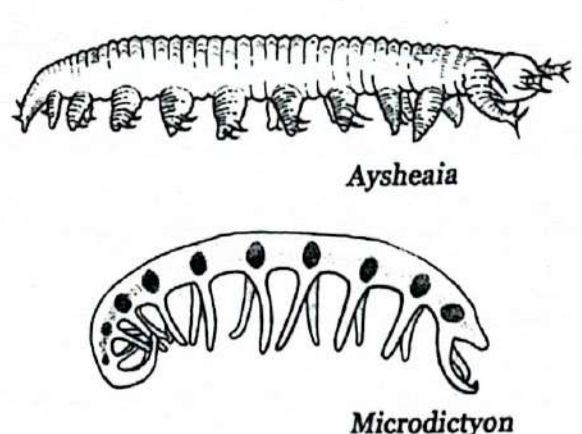


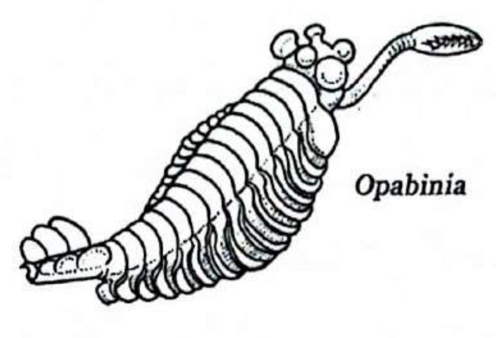
الشكل 3,6 **مفصليات سجّيل بيرجس الكامبرية.** تظهر هذه المفصليات تفاوتات في التصميم، بالإضافة إلى أعدَاد وأنواع مختلفة من الأطراف المفصلية المتخصصة (رسم ليان أولدز).

(*Olenoides serratus*) (انظر الصورة في بداية الفصل) أو *ناورويا كومباكتا* (*Naroaoia compacta*) إلى أنواع *وابتيا فيلدنسس* (*Waptia fieldensis*) الأقل شيوعاً و*ماريلا سبلندس* (*Marrella splendes*) (أكثر أحافير بيرجس وفرة)، و*كاناداسبس بيرفكتا* (*Canadaspis perfecta*) (الشكل 3,6). إن الصفة السائدة في جميع هذه الحيوانات هي المظهر المتشابه لعديد من الفصوص والزوائد المرتبطة بها، وهذا التعضّي الشديد التكرار في الحقيقة ليس محصوراً في المفصليات، ففصّيات الأرجل تكرّر عدداً كبيراً من أجزاء جسمها القليلة نسبياً.

كان لدى ستيفن جود بعض الكائنات المفضّلة من فصّيات الأقدام، من بينها حيوان يُعرف باسم *آيشيا* *Aysheaia* (الشكل 4,6)، وأحد أسباب هذا الاهتمام الشديد بالآيشيا هو التعضية المتكررة والبسيطة للجسم والأطراف الأنبوبية الشكل. هاتان الخاصيتان رفعتا احتمالية أن هذا الحيوان مثَّلَ شكلاً بدائياً كان باكورةً لكائنات ذات جسم وأنماط أطراف أكثر تعقيداً. لقد اعتقد والكوت في البداية أن *آيشيا* دودة حلقية، ورأى آخرون بمن فيهم جود أنها تنتمي إلى فصّيات الأرجل. هذه المجموعة هي القريب الألصق لشعبة حديثة من متعدّدات الأرجل ناعمات الأجسام تعرف ب*حاملات المخالب* *Onychophora* (أو *الديدان المخملية*). من المهم لقصتنا هنا أن نعرف أن مجموعة حاملات المخالب الحية وأحافير مجموعة فصّيات الأرجل المنقرضة هما القريب الأقرب للمفصليات، مُشكّلة ما يعرف بمجموعة «الأخوات» (sister group). ويعتقد أن المفصليات قد تطوّرت من سلف بعض أنواع فصّيات

الأرجل. وكانت أحافير فصّيات الأرجل على الأخص ذات فائدة معرفية فيما يتعلق بتكوين صورة عن الكيفية التي تطوّر بها تصميم أجسام أسلاف المفصليات وأطرافها.







الشكل 4,6 **فصّيات الأرجل الكامبرية من سجّيل بيرجس.** لهذه الحيوانات أطراف غير مفصلية وهي أقرب أقارب المفصليات (رسم ليان أولدز).

من أكثر الحيوانات الكامبرية إدهاشاً مجموعة فصّيات الأرجل التي تعتبر الأقرب على نحو معقول، من ناحية الشكل، لما يعتقد

علماء الأحافير أنه الشكل البدائي للمفصليات (الشكل 4,6). أجريت دراسات مفصّلة حول أحافير مثل *أوبابينيا* (*Opabinia*) و*أنومالوكاريس* (*Anomalocaris*) المرعبة بالإضافة إلى فصّيات أرجل ومفصليات أخرى. تقترحُ هذه الدراسات ظهور سلسلة من الابتكارات في فصّيات الأرجل بما في ذلك التفصيص والهيكل الخارجي الصلب والطرف ثنائي التفرّع (biramous) الشبيه بالشوكة. وقد غدت هذه الخصائص لاحقاً أساسية في المفصليات. تتوزّع هذه الخصائص بشكل متغاير في مجموعات فصّيات الأرجل؛ *فالآيشيا* لا تمتلك أياً من هذه السمات ولذلك تعتبر الكائن البدائي في المجموعة، أما *الأوبابينيا* فهي ذات جسم مفصّص لكنه يفتقر إلى الأطراف ثنائية التفرّع، وأما *الأنومالوكايريس* فتمتلك أطرافاً ثنائية التفرّع لكنها تفتقر إلى الهيكل الخارجي كامل التصلب (بحوزتي الكثير لقوله في الفصل اللاحق حول الفرص الهائلة التي أتاحها هذا التصميم الأولي للطرف).

سمح لنا تنوعّ فصّيات الأرجل والمفصليات في بيرجس وتشينج يانج والمواقع الأخرى برؤية الحدث الكامبري باعتباره واقعة غنية بالأحداث تَطورَ خلالها تصميم الجسم، وليس حدثاً لحظياً من ذلك النوع السريع السحري التأثير. إن 10 أو 15 مليون سنة لحظة خاطفة في تاريخ الأرض والحياة الواسع، لكنها وقت كافٍ لاختراع زوائد جديدة وتغيير تصميم الجسم، إلخ. (وحتى نتخيل الأمر يمكننا مقارنة ذلك بفكرة أن الثدييات- الرئيسيات والقوارض والخفافيش والزبّابات (shrews) وآكلات اللحوم وغيرها- ظهرت في السجل الأحفوري خلال الـ 10-15 مليون سنة التالية لاختفاء الديناصورات قبل 65 مليون سنة).

السؤال الذي يواجهنا هنا بالرغم من ذلك هو: ما الذي دفع هذا التطوّر؟ وهنا يقدم علم الإيفوديفو أفكاراً جديدة في هذا الشأن.

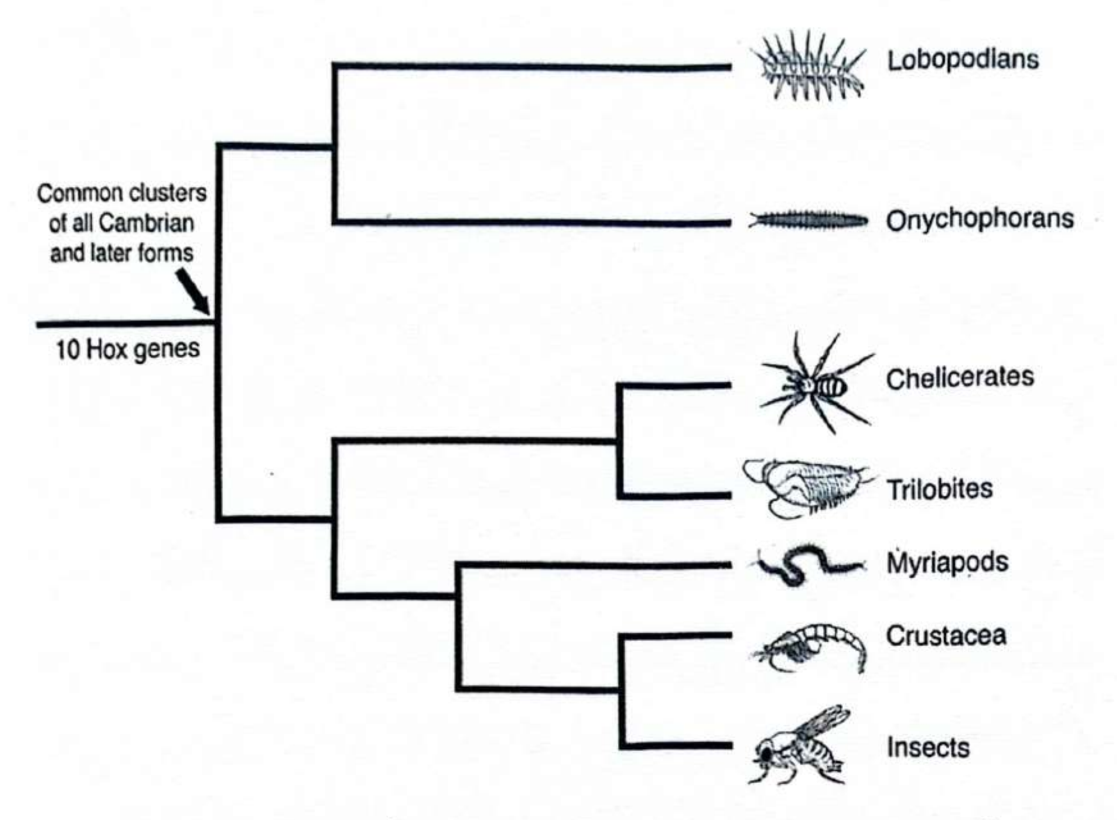
جينات جديدة لحيوانات جديدة؟

إن الفكرة الأبسط والمتعارف عليها، منذ فترة طويلة، لربط الجينات بتطوّر الأشكال المعقدة هي ضرورة تطور جينات جديدة من أجل ظهور أنواع جديدة من تصاميم الجسم وبناه. إن الجاذبية البديهية لهذه الفكرة مفهومة؛ فبما أن شكل نوع معين هو نتاج معلوماته الجينية الخاصة فإن الأشكال الجديدة تتطلب معلومات جديدة وبالتالي جينات جديدة. لكن وكما سنرى قريباً فإن اختراع «جينات جديدة» لا يقدم تفسيراً لأصل أغلب المجموعات الحيوانية أو لتنوّعها، رغم جاذبية الفكرة.

طرح إد لويس من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (Caltech) النسخة الأولى من فكرة أن «الجينات الجديدة» ترتبط بظهور مجموعات حيوانية معينة من المفصليات من خلال دراساته الرائدة حول جينات *Hox* في ذبابة الفاكهة والتي حصل بفضلها على جائزة نوبل. اقترح لويس أن العديد من جينات *Hox* التي تحدّد مختلف أنواع فصوص الجسم في الحشرات تطوّرت من مجموعة أصغر من جينات *Hox* التي حددت عدداً أصغر من أنواع فصوص الجسم المتباينة في أسلاف الحشرات والمفصليات. كانت فرضية لويس خاطئة، إلّا أنّ فحص هذه الفكرة واختبارها أوضح بطريقة رائعة كيفية عمل منطق الإيفوديفو، وقاد ذلك إلى رسم صورة واضحة عن الكيفية التي تطوّرت بها عدة أنواع من أجسام المفصليات.

كيف يمكن أن نكوّن معرفة عن جينات أسلاف المفصليات؟ الاستراتيجية مرتبطة مرة أخرى بالمنطق النقدي الذي يقول إن ما تتشاركه مجموعتان أو أكثر كان موجوداً على الأرجح في سلفها المشترك، لكن أي الحيوانات ندرس؟ صحيح أن *الأوبابينيا* و*الأنومالوكاريس* وأخواتها الكامبريات قد اختفت منذ زمن بعيد، لكن الحيوانات التي تمتلك أقداماً فصّية لم تختف تماماً. فعلاقة حاملات المخالب بأحفورة بيرجس الكامبرية *آيشيا* لا تقتصر على الشبه النسبي، بل كانت تدبّ على الأرض بأقدام فصية مثلها تماماً (الشكل 5,6). لقد استنتجتُ مع طلابي بوب وورن (Bob Warren) وجين جرينير (Jen Grenier) وتيد جاربر (Ted Garber) أن حاملات المخالب ستكون أفضل المحاولات في عملية البحث عن جينات أسلاف المفصليات، لأن أي جينات مشتركة بين حاملات المخالب الحيّة والمفصليات الحيّة يفترض بها أن تكون موجودة في آخر سلف مشترك بينهما.

كانت المشكلة التي واجهتنا هي عدم وجود حاملات المخالب في الولايات المتحدة فضلاً عن وسكنسن، لكن أستراليا مليئة بها. وقد دفعتُ بوب وجين لمغادرة وسكنسن في منتصف شتائها البديع والتوجّه إلى نيوساوث ويلز في أستراليا حيث يتواجد شريكنا خبير صيد حاملات المخالب بول ويتنجتون (Paul Whitington) (كان حينها في جامعة نيوإنجلند في آرمدال، نيوساوث ويلز) الذي سيدلهم على أمكنة هذه المخلوقات المنعزلة والمموهة جيداً في جذوع الأشجار المنهارة. طمأنهم بول قائلاً: لا يوجد أي داعٍ للقلق، فقط احترسوا من الأفاعي البنية والعناكب السامة ومئويات الأرجل العملاقة اللاسعة

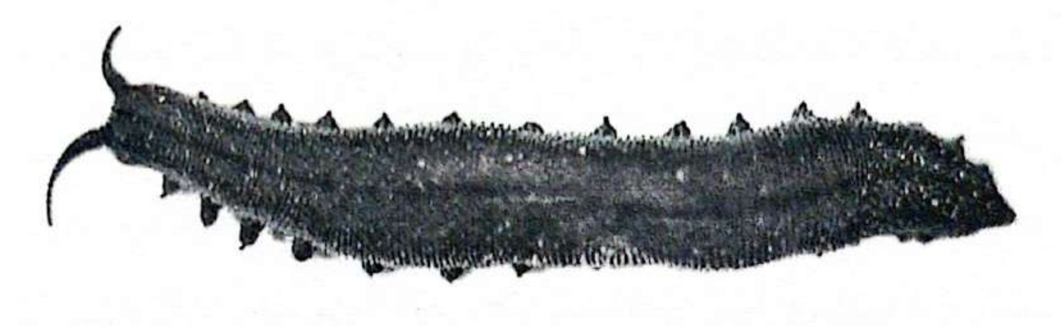


الشكل 5,6 **الشجرة التطورية للمفصليات وفصّيات الأرجل.** يظهر في الشكل العلاقة بين المجموعات الحية والمنقرضة، يجب على السلف المشترك للمجموعتين والذي يرجح أنه عاش قبل العصر الكامبري أن يمتلك عشرة جينات *Hox* على الأقل لأن هذا العدد يوجد في جميع الأخلاف الحية (رسم جوش كليس).

التي تعشق هذه الجذوع أيضاً.

استغرق منهم الأمر فصلي صيد لإنجاز المهمة لكن جين وبوب تمكّنا في النهاية من إيجاد عيّنات كافية من أنواع بُنّية صغيرة (*أكانثوكيرا كابوتنسس* *Akanthokera kaputensis*، الشكل 6,6) لاستخلاص الدنا والأجنة لدراسات إضافية. كان هدفهما الأساسي تحديد جميع جينات *Hox* في حاملات المخالب و«مشاهدة» كيفية استخدام هذه الجينات في صناعة هذا الحيوان. نعرف أن لذبابة الفاكهة عشرة جينات *Hox*، ثمانية متعارف على وظيفتها واثنان ليسا كذلك ويخدمان أدواراً أخرى في عملية النموّ. كان السؤال الأساسي المطروح على جين وبوب وتيد:

كم عدد جينات *Hox* في حاملات المخالب؟ وما هي؟ لقد عمدوا إلى عزل الدنا من هذه الحيوانات واستخدموا تقنيات تمكّنهم من البحث عن قطع من دنا جينات *Hox* من بين العدد الهائل للجينات في جينوم حاملات المخالب. ورغم امتلاك هذه الحيوانات بضعة أنواع متمايزة من الفصوص والزوائد، لكن الفريق وجد أنه بغض النظر عن بساطة حاملات المخالب النسبية فإنها تحوز على جميع جينات *Hox* المعروفة في الذباب والمفصليات الأخرى.





الشكل 6,6 حاملة المخالب *أكانثوكيرا كابيوتنسس* (تصوير جين جرينيير وستيف بادوك).

يدلنا هذا على أن جميع جينات *Hox* في المفصليات كانت موجودة في آخر سلف مشترك بينها وبين حاملات المخالب، مما يعني أن جميع المفصليات وفصّيات الأرجل الكامبرية امتلكت ذات المجموعة الكبيرة المكوّنة من عشرة جينات نحت، بدءًا من الآيشيا إلى *الأنومالوكاريس* و*المايكروديكتيون* (*Microdictyon*) وإلى *الماريلا* (*Marrella*). أضف إلى

ذلك أن تصاميم جميع المفصليات اللاحقة -العناكب ومئويات الأرجل والحشرات وجميع أنواع القشريات -نُحتت بواسطة المجموعة ذاتها من جينات النحت *Hox*.

كانت الفكرة المفضلة لدى العديد من علماء الأحافير حتى صدور التقرير الأول لاكتشافاتنا هي أن الظاهرة الكامبرية قد اشتعلت بسبب توسّع في عدد جينات *Hox* في الحيوانات. ورغم أن بياناتنا جاءت معارضة تماماً لهذه الفكرة إلا أننا لم نصب بأي إحباط. فالقدرة على اختبار هذه الفكرة عبر تفحص جينات حيوانات غامضة قدّمت مثالاً على الإمكانيات الجديدة لعلم الإيفوديفو في تسليط الضوء على الماضي البعيد. وبالنسبة لعلماء الأحياء الجزيئية القابعين في المختبرات مثلي ومثل تلاميذي، فقد كان مثيراً أن نساهم بإضافة حقيقية في قصة الحيوانات الكامبرية.

لكنها كانت البداية، والسؤال ظل كما هو: إنْ لم تكن جينات نحت جديدة فما الذي أدى إذاً إلى تطوّر الحيوانات الكامبرية والأشكال اللاحقة؟ إن مجرد وجود مجموعات معينة من الجينات في الدنا لا يقدم لنا الإجابة. لقد كان المفتاح هو النظر في جغرافيا الجنين وصناعة الأنواع المختلفة من المفصليات، إنها تقول لنا إن تطور الأشكال ليس متعلقاً كثيراً بالجينات التي تمتلكها بل بكيفية استخدامها.

جينات *Hox* المراوغة وقانون ويليستون

إن قصة تطوّر المفصليات من الحقبة الكامبرية فصاعداً هي في جانب كبير منها قصة زيادة عدد الفصوص وتنوّع الأطراف. تمتلك أجسام

ثلاثيات الفصوص ثلاث مناطق رئيسية -الرأس والجذع والمؤخرة - وتكون معظم الفصوص أو كلها والزوائد في كل منطقة متشابهة بعضها مع بعض لدرجة كبيرة، وعموماً يكون الفرق بينها في الحجم فقط. ففي نماذج لمجموعات المفصليات الحيّة التي ظهرت قبل نهاية العصر الكامبري أو في الـ 150 مليون سنة التي تلتها، يزيد عدد أنواع الزوائد كثيراً ليصل إلى دزينة أو أكثر. تخصصت زوائد المفصليات الموجودة في الرأس والجذع والذيل لتعمل على التغذية والتنقل والتنفس والحفر والتنقيب والاستشعار والاتصال الجنسي وإيواء الصغار والدفاع. إن نجاح المفصليات العظيم يعود بلا شك لتكيفاتها التي حدثت بسبب ازدياد تخصّصية أنواع الأطراف.

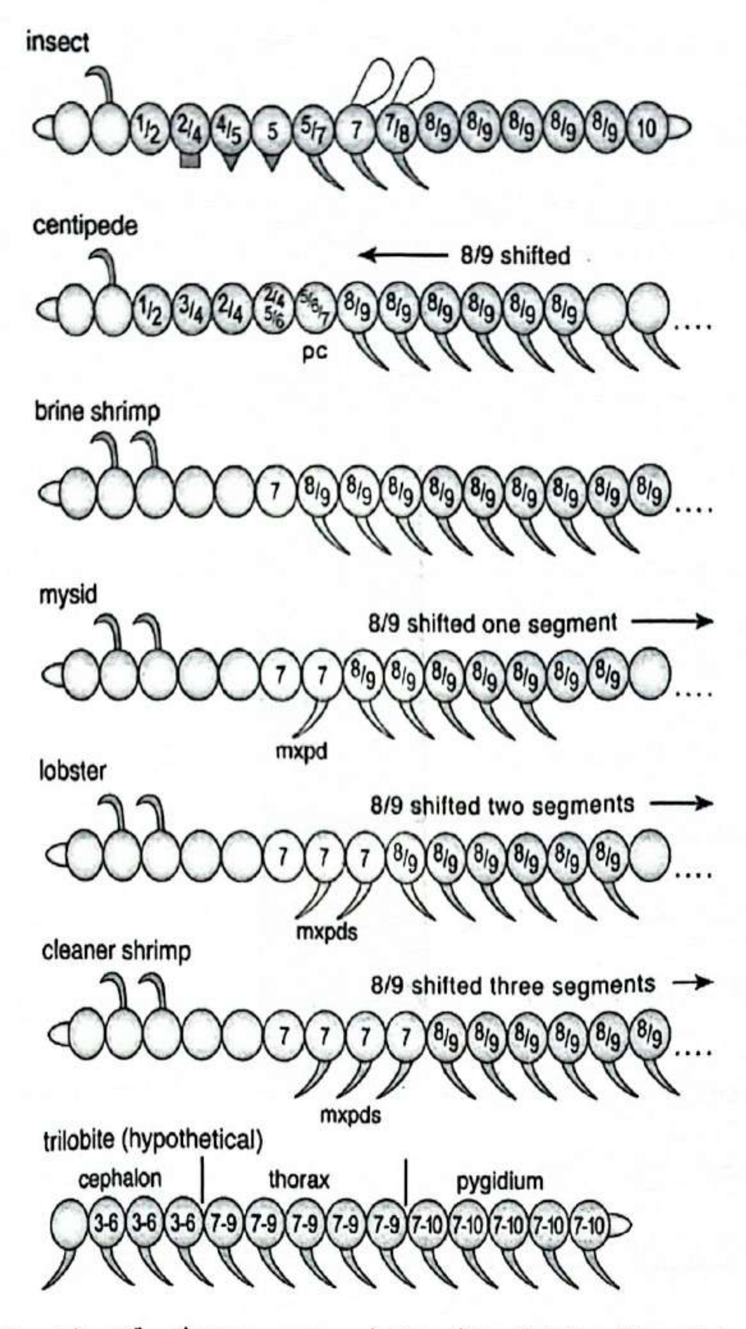
كيف ارتفع عدد أنواع الزوائد المتمايزة؟ لا بد أن المسؤول عن ذلك حدوث تغيّرات مؤثرة في جغرافيا أجنّة المفصليات. ولفهم ما حدث سننظر مرة أخرى في الحيوانات الحيّة. إن التحكّم الجيني بأنواع الأطراف معروف بصورة أكبر في ذبابة الفاكهة، حيث نعرف أن تشكّل كل نوع من أنواع الزوائد -تشمل مجموعة متنوّعة من الزوائد الفكية، والأزواج الثلاثة المختلفة من الأرجل، والبطن الخالي (عموماً) من الزوائد، والأعضاء التناسلية (وهي زائدة معدلة) -خاضع لبروتينات *Hox*. هذا التنوّع الكبير في أنواع الزوائد والوظائف تم التوصّل إليه من خلال انتشار جينات *Hox* مختلفة في مناطق مختلفة على طول المحور الرئيسي للجسم. فجغرافيا جنين الحشرة تتضمن توليد العديد من «مناطق» *Hox* المفردة أو المركّبة (مناطق الجينات موضحة بالأرقام من 1 إلى 10 في الشكل 6 ,7).

كيف كانت جغرافيا الأجنة الكامبرية؟ وكيف كانت جينات *Hox* تتوزّع في هذه الحيوانات قبل 500 مليون سنة؟ لا نستطيع معرفة ذلك مباشرة لكننا نستطيع الاستدلال مرة أخرى بناء على مقارنات الجغرافيا الجنينية وكيفية استخدام جينات *Hox* في المفصليات الحيّة المختلفة. على سبيل المثال تمتلك بعض المفصليات كروبيان المياه المالحة (brine shrimp) منطقة صدرية بسيطة تتشابه فصوصها وزوائدها كثيراً. ويُعتقد أيضا أن هذه الجغرافيا العامة سادت في أسلافه البدائيين. يظهر الشكل 7,6 جنين روبيان المياه المالحة وكيف يُنشّط بروتينا *Hox* (رقم 8 و9) في أنماط تكاد أن تكون متطابقة في المنطقة الصدرية النامية فقط وليس في المناطق الأخرى كما هو الحال في الحشرات. في مئويات الأرجل، وهي مجموعة رئيسية مختلفة من المفصليات، تشبه جغرافيا جينات *Hox* في الجنين جغرافيا روبيان المياه المالحة، إذ إن جذع الجسم الطويل مركّب من فصوص متطابقة تحمل أطرافاً متطابقة. يُنشّط في جنين مئويات الأرجل بروتينا النحت ذاتهما (رقم 8 و9) في كل فصّ من هذه الفصوص وفي كل طرف. في كلا الحيوانين المفصليين تعكس الفصوص متطابقة التنميط مناطقَ نشاط لبروتين أو لبروتينات *Hox* ذاتها، وبالتالي فإن ذلك يعني أنه في المفصليات الكامبرية مثل ثلاثيات الفصوص، من المرجّح أن تعكس كتل الفصوص والزوائد المتشابهة مناطق بروتينات *Hox* ذاتها.

نعرف أيضاً أن الحدود بين مناطق نشاط *Hox* يكشفها عادة تغيّر في نوع الفص أو الزائدة في المفصليات. في روبيان المياه المالحة ومئويات الأرجل، تُنشّط الخلايا الموجودة أمام المنطقة الصدرية الطويلة مباشرة بروتينات *Hox* مختلفة أو توليفة من بروتينات *Hox* (رقم 7 و5/ 6/ 7

على الترتيب) وتكوّن نوعاً مختلفاً من الزوائد، فتكون عبارة عن زوائد تغذية عند الروبيان ومخالب سامة لشل الفرائس أو الدفاع عند مئويات الأرجل. إن الاختلافات في نوع الزائدة الناتجة عن اختلاف مناطق *Hox* فوق محور الجسم وتحته تمثل علاقة شائعة جداً.

الصورة الكلية فيما يتعلق بالمفصليات هي أن مناطق بروتينات *Hox* المتغيّرة ترتبط في علاقة وثيقة بالاختلافات التطوّرية في أعداد وأنواع الزوائد الخارجة من الفصوص. ولا ينطبق هذا على الصفوف الرئيسية في المفصليات فقط، ولكن على التصنيفات الفرعية داخلها أيضاً. لقد أوضح ميكاليس أفيروف (Michalis Averof) ونيبام باتل (Nipam Patel) دور جينات *Hox* المزاحة في التطور بطريقة جميلة، إذ عمدا إلى جمع وفحص أجنّة أنواع مختلفة من القشريات (المجموعة المفصلية التي تضم الروبيان والصدف البحري اللاصق (barnacle) والسلطعون وجراد البحر). أحد الاختلافات البارزة بين هذه المجموعات هو عدد الأقدام الفكية (maxillipeds) وهي زوائد التغذية في مقدمة المنطقة الصدرية التي تطوّرت عبر تعديل أطراف سابقة. لا يمتلك روبيان المياه المالحة أي قدم فكّية ولا القشريات البدائية أيضاً، أما القشريات الأخرى فتمتلك زوجاً واحداً أو اثنين أو حتى ثلاثة أزواج من الأقدام الفكية كما عند جراد البحر. إن هذه الاختلافات الهامة بين القشريات تعود لتغيّرات طفيفة في جغرافيا الجنين. لقد وجد أفيروف وباتل أن مناطق نشاط بروتيني *Hox* (رقم 8 و9) قد أزيحا للوراء بمقدار فص واحد أو اثنين أو ثلاثة في هذه القشريات، على الترتيب، مقارنة بالقشريات التي لا تمتلك أقداماً فكّية (الشكل 7,6). هناك علاقة



الشكل 7,6 صاغت إزاحة مناطق نشاط جينات *Hox* الفروقات الرئيسية في تصميم المفصليات. تظهر جينات *Hox* مرقمة في الرسم. لاحظ الإزاحات النسبية في مواقع حدود جينات *Hox* 7 و8 و9 في الحشرات ومئويات الأرجل والأنواع الأربعة من القشريات (روبيان المياه المالحة، وسرطان البحر، والمايسيدات (mysids) والروبيان الرمّام) في المنطقة المظللة في الرسم، هناك علاقة دقيقة بين عدد الأقدام الفكية وعدد الفصوص التي تنشط فيها الجينان 8/9 وقد أزيحت إلى الخلف بعيداً عن العنق في روبيان المياه المالحة (هذا الحيوان لا يمتلك أي أقدام فكّية). لمئويات الأرجل مخلب سام (pc) يسبق الأرجل مباشرة، أما ثلاثيات الفصوص فلربما احتوى جسمها على ثلاث مناطق معرفة بثلاثة توليفات مختلفة من جينات *Hox* (رسم ليان أولدز).

متبادلة واضحة بين مقدار الإزاحة وعدد الأقدام الفكّية. بالإضافة إلى ذلك فإن هذه الإزاحات والأقدام الفكّية تبدو وكأنها قد تطورت عدة مرات بصورة مستقلة في الأنواع المختلفة من القشريات موحية بأن التكيفات الوظيفية المتشابهة قد تم التوصل إليها بآليات متشابهة في حيوانات مختلفة (سأقول الكثير حول أهمية الحالات المتكررة من التغيّرات المتشابهة في الفصل القادم).

لقد نحتت إزاحة مناطق *Hox* فروقاتٍ واضحة على طول محور الجسم الرئيسي في مجموعات المفصليات مثل العناكب والقشريات ومئويات الأرجل والحشرات. وإنه استكمال معقول جداً التأكيد على أن هذا الأمر انطبق أيضاً على الحيوانات الكامبرية، حيث إن إعادة توزيع مناطق الجسم وتخصص الزوائد تظهر جلية واضحة في أحافير المفصليات. إن قطع الفصوص المتشابهة في الأصنوفات الأحفورية كانت بكل تأكيد مناطق جينات *Hox* ذاتها (الشكل 7,6)، والزيادة في عدد الزوائد المختلفة وأنواع الفصوص خلال تطوّر المفصليات هي نتاج توليد عدد أكبر من المناطق المختلفة في الجنين بحيث تنشط فيها جينات *Hox* محددة أو توليفات معينة منها، *وبالتالي فإن هذه الإزاحة النسبية لمناطق Hox هي إحدى الآليات التي تدعم قانون ويليستون* -تخصص الأجزاء المتكرّرة يتطلب أن تقع الأجزاء المختلفة في مناطق *Hox* مختلفة.

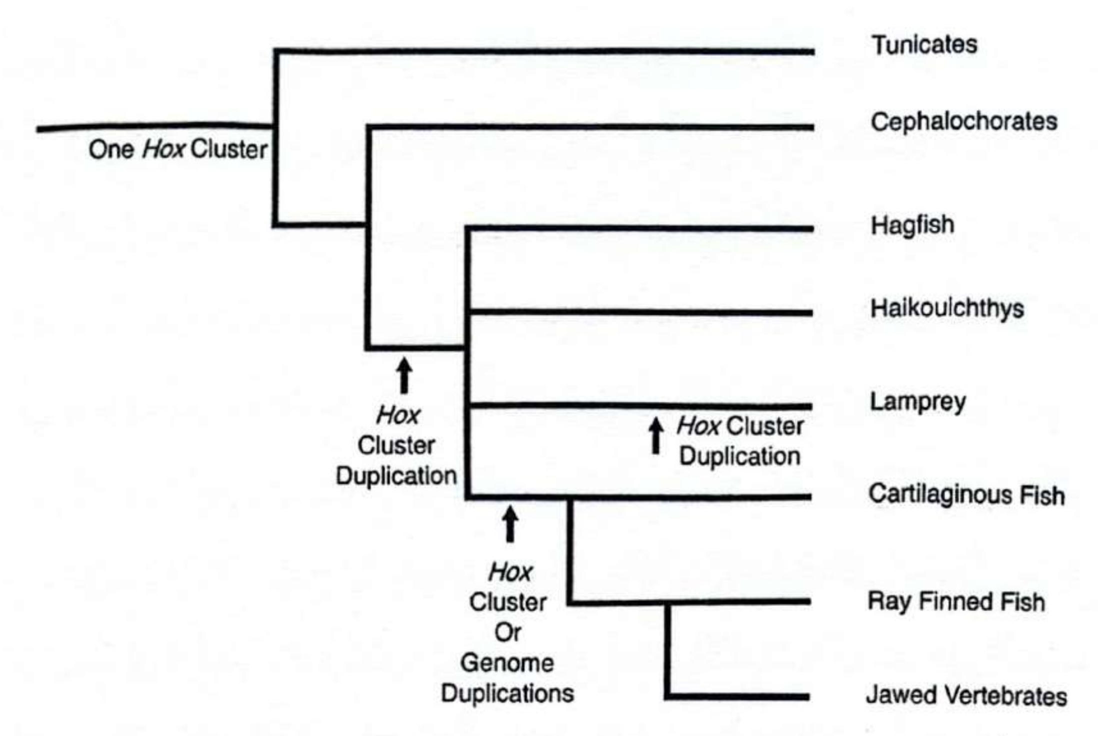
إن ظاهرة إزاحة مناطق *Hox* ليست مقصورة على المفصليات، فهذه الآلية الأولية تكمن وراء تنوّع الخصائص التشريحية الرئيسية في شعبتنا: الفقاريات.

صناعة الفقاريات:

جينات *Hox* أكثر وعدّة إزاحات

نستطيع تعقب أصول عائلتنا أيضاً حتى الوصول إلى الحيوانات الكامبرية، فنحن ننتمي إلى الفقاريات وهي جزء من مجموعة أكبر تعرف بالحبليات وهي الحيوانات التي تمتلك حبلاً ظهرياً. وإلى هذه الأخيرة تنتمي الردائيات (tunicates) مثل بخاخات البحر، وحبليات الرأس (cephalochordates) مثل الرميح (lancelet). والحبليات جزء من ثنائيات الفم في شجرة الحيوان (الشكل 8,6). وقد عرفت الأحفورة البيرجسية *بيكايا* (*Pikaia*) لفترة طويلة باعتبارها أقدم الحبليات، لكن المكتشفات الحديثة المذهلة في تشينج يانج دفعت بتاريخ ظهور أقدم الفقاريات إلى الوراء ليصبح قبل حوالي 520 مليون سنة. وكشفت بعض الكنوز الدفينة من أنواع الحيوانات عن تفاصيل تعقيد تشريحي مدهش للفقاريات في تلك الفترة.

لقد كشفت أحفورة سمكة عديمة الفك تعرف باسم *هايكوإكثيس إركيكانسيس* (*Haikouichthys ercaicunensis*) عن وجود فصّ رأسي ذي عينين، واحتمالية وجود حويصلات أنفية، وعشرة عناصر فقرية أو أكثر، وخياشيم، وزعنفة ظهرية وأخرى بطنية. إن هذا التشريح أكثر تعقيداً من *بيكايا* التي ظهرت لاحقاً، ويدلّ ذلك على أن تطوّر الجسم الفقاري بلغ قدراً جيداً من التعقيد في العصر الكامبري المبكر. تؤكد هذه الاكتشافات الحديثة على أهمية السجل الأحفوري وعلى أهمية الحفريات القائمة حاليا والجديدة. لكن سيظل تأريخ الظهور الأول للمجموعات أو خصائصها العيانية غير محسوم على الدوام، لأن الاكتشافات اللاحقة



الشكل 8,6 **شجرة تطور الحبليات وتوسّع عناقيد *Hox* خلال تطور الفقاريات.** امتلك السلف المشترك لجميع الحبليات عنقوداً واحداً كما هو الحال في الردائيات وحبليات الرأس. تضاعفت العناقيد عدة مرات بعد ذلك: في الخط إلى السمك عديم الفكين، وفي الخط إلى السمك الغضروفي (القرش)، ومرة أخرى في الجلكيات (lampreys). ولأن *الهايكوإكثيس* فقاري كامبري لم تؤكد صلاته التطورية فقد تفرع من الشجرة في نفس الوقت (غير المحسوم) مثل سمك الجريث (hagfish) والجلكي والسمك الغضروفي (رسم جوش كليس).

تدفع التأريخ دائماً إلى الوراء، وفي حالة الفقاريات فقد دفعتها 15 مليون سنة. أضف إلى ذلك، رغم أن الفقاريات لم تكن المجموعة الأضخم في بداية العصر الكامبري ومنتصفه إلا أن اكتشاف *الهايكوإكثيس* المفترسة في تشينج يانج يضعها بقوة في قلب الأنظمة البيئية الكامبرية.

يعتبر اختراع عدة بنى وتحسينها إحدى سمات نشوء الفقاريات بما في ذلك الأدمغة الأكثر تعقيداً وبنى الاستشعار والغضاريف وهيكل الجسم والجمجمة. قادت العديد من الابتكارات اللاحقة إلى البرمائيات

والزواحف والطيور والثدييات التي نعرفها جيداً. وتماماً كما هو الحال في فصّيات الأرجل والمفصليات نريد أن نعرف إن كانت بداية تطوّر الفقاريات في العصر الكامبري قد اعتمدت على عُدة أدوات من جينات النموّ شبيهة جداً بتلك التي امتلكتها المجموعات الأخرى أو أن تغيّرات في عدة الأدوات قد لعبت دوراً في نشوء أسلاف الفقاريات.

لا نستطيع بطبيعة الحال استرجاع جينات *الهايكوإكثيس*، لكننا نستطيع دراسة بعض ما ينوب عنها من الأنواع الحيّة التي تشغل مواقع رئيسية في الحبليات وثنائيات الفم من أجل الاستدلال بها على التعقيد الجيني لأسلاف الفقاريات. وأحد هذه المجموعات الرئيسية هي حبليات الرأس. تفتقر هذه الحيوانات إلى السمات الفقارية المتعلقة بالجمجمة أو بالبنى العظمية لكنها المجموعة الأخت للفقاريات بنفس الطريقة التي نعتبر فيها حاملات المخالب الحيّة مجموعة أختاً للمفصليات. وتكشف محتويات عنقود *Hox* في حبليات الرأس محتويات العنقود في آخر سلف مشترك بينها وبين الفقاريات.

إن الرميح (lancelet) هو حبلي الرأس الوحيد المتبقي اليوم. ويمكن إيجاد هذا الحيوان الذي لا يتعدى الإنشين إلى الثلاثة إنشات طولاً في خليج تامبا بفلوريدا وبعض المياه الأخرى. عندما تفحص جوردي جارسيا فيرنانديز (Jordi Garcia-Fernandez) وبيتر هولاند (Peter Holland) جينات *Hox* وجدا عنقوداً واحداً فقط. لنتذكر أن الفقاريات المعاصرة مثل الفئران والبشر تمتلك أربعة عناقيد فيها 39 جيناً. يخبرنا الرميح أن ازدياداً في عدد عناقيد *Hox* حدث في وقت ما بعد انفصال الفقاريات عن حبليات الرأس في العصر الكامبري أو أبكر

قليلاً. نعرف أيضاً أن ثنائيات الفم الأخرى مثل الردائيات وشوكيات الجلد تمتلك عنقوداً واحداً من جينات *Hox*. إذاً بينما كان جميع التنوّع الحاصل في الردائيات وشوكيات الجلد منذ العصر الكامبري يدور، كالمفصليات، على عنقود واحد يحوي حوالي عشرة جينات *Hox*، عمدت الفقاريات إلى زيادة عدد جينات *Hox*.

في أي مرحلة من تطوّر الفقاريات ارتفع عدد عناقيد *Hox*؟ هل يمكن أن يكون هذا الارتفاع هو سبب تطوّر الفقاريات؟ يلزم تفحّص عدد كبير من الأنواع الحيّة التي تمثل مجموعات مختلفة في فروع مختلفة بشجرة العائلة الفقارية من أجل الإجابة عن هذا السؤال. لقد وُجد أن جميع الثدييات والطيور وأسماكاً محددة بما في ذلك مجوّفات الأشواك (coelacanth) البدائية التي تسكن أعماق البحار تمتلك أربعة عناقيد *Hox*، ويمكننا أن نستنتج من ذلك أن السلف المشترك لجميع هذه الفقاريات من ذوات الفكين امتلك أربعة عناقيد *Hox*.

لكن الفقاريات الحيّة الأكثر بدائية مثل الجلكيات تمتلك عناقيد *Hox* أقل. إن التفحّص الدقيق لجينات هذه العناقيد ومقارنتها بالأسماك العظمية والثدييات يشير إلى أن عناقيد *Hox* الأربعة لدينا نتجت عن دورتين من تضاعف عناقيد *Hox* في بدايات تطوّر الفقاريات: الدورة الأولى حدثت بعد انفصال حبليات الرأس عن الجلكيات، والدورة الثانية حدثت في وقت ما قبل ظهور الأسماك العظمية. وبالنظر في شجرة عائلتنا مرة أخرى (الشكل 6 ,8) نستنتج أن أحافير تشانج يانج من الأسماك ربما امتلكت عنقود *Hox* واحداً فقط أو اثنين لأنها افتقرت إلى الفكين.

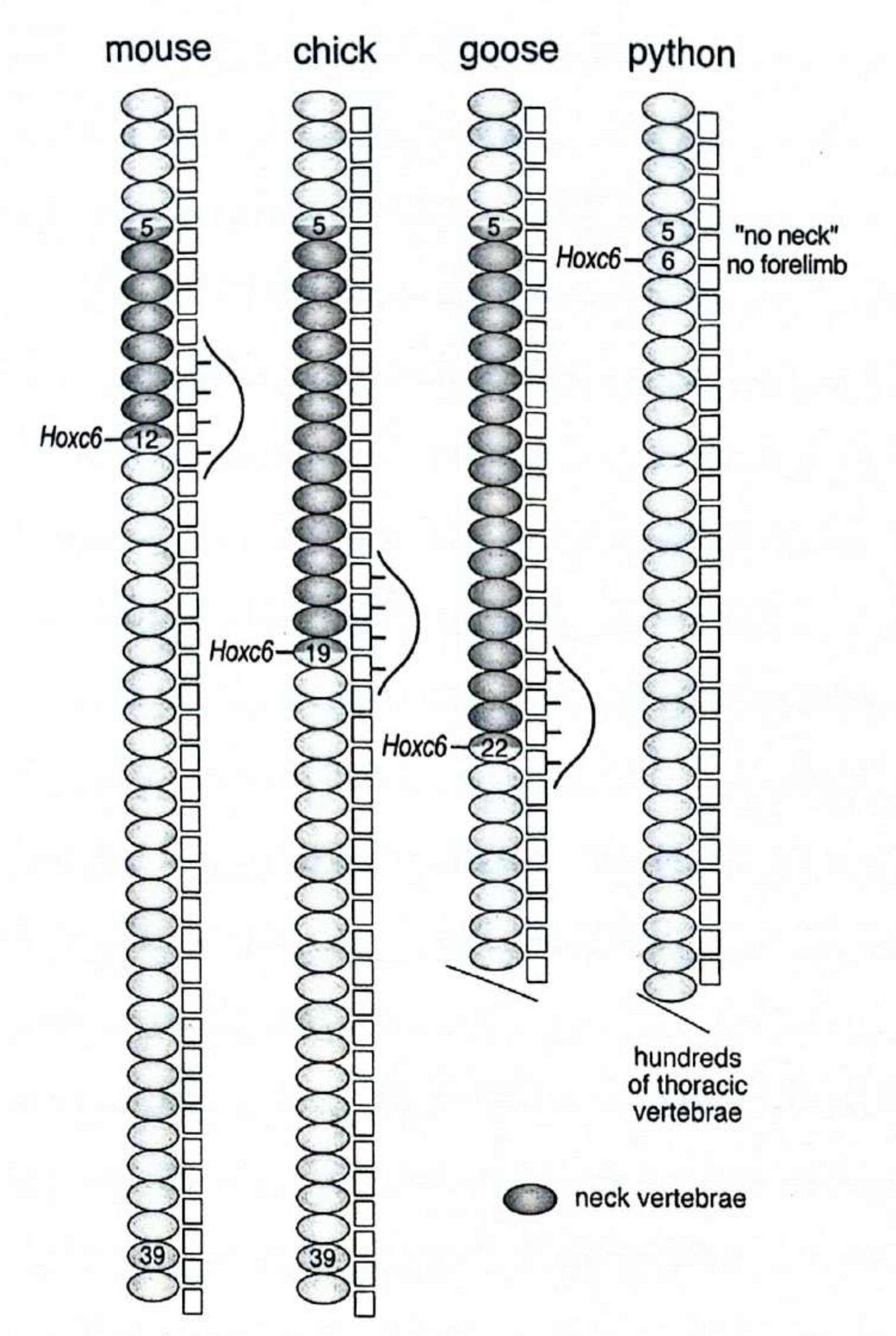
اتضح أن اختلاف عدد عناقيد *Hox* في الفقاريات المختلفة يعكس

اختلافات في الحجم الكلي لعدة الأدوات الجينية، ولم يقتصر التضاعف على عناقيد جينات *Hox* خلال تطور الفقاريات بل شمل أيضاً أنواعاً مختلفة من جينات عدة الأدوات. ربما حدث ذلك من خلال تضاعف الجينوم بأكمله أو أجزاء كبيرة منه، كما أن عدة الأدوات المتوسّعة في الفقاريات العليا تدعم بقوة الفكرة بأن ازدياد عدد الجينات لعب دوراً في تطوّر تصميم الجسم في بداية تطوّر الفقاريات. ومن المؤشرات على التطوّر التشريحي للحبليات عدد أنواع الخلايا في المجموعات المختلفة، فالبشر والثدييات العليا تمتلك عدداً أكبر من أنواع الخلايا مقارنة بحبليات الرأس التي تفتقر إلى أنواع الخلايا المنتجة لغضاريفنا وعظامنا والرأس وبعض أبنية الاستشعار. وهذا يعني أن إحدى نتائج زيادة عدد جينات عدّة الأدوات هي زيادة أنواع الخلايا وزيادة مستوى التعقيد النسيجي، حيث يتم التوصّل لهذا التعقيد النسيجي عبر استخدام جينات أكثر لتوليد مزيد من توافقيات النموّ.

إلا أن زيادة عدد الجينات ليس هو القصة الرئيسية في التطوّر اللاحق للفقاريات العليا. إنه من الضروري تذكر أن عناقيد *Hox* الأربعة قد ظلت مستقرة خلال تطوّر البرمائيات والزواحف والطيور والثدييات. فالضفادع والأفاعي والديناصورات والنعام والزراف والحيتان تطوّرت محتفظة بمجموعة متشابهة من عناقيد جينات *Hox* الأربعة. ومرة أخرى لا يخبرنا عدد جينات *Hox* عن كيفية تطوّر هذه الأشكال. إن صناعة التنوّع في هذه الحيوانات بالنسبة إلى محاور أجسامها الرئيسية وأجزائها، كما في المفصليات، يرجع إلى تغيّر في جغرافيا الجنين عبر إزاحة عدد كبير من مناطق جينات *Hox*.

في الفقاريات على سبيل المثال يكون الانتقال بين نوع معين من الفقرات وآخر -عنقي/ صدري أو صدري/ قطني أو قطني/ عجزي -مُناظراً للانتقال بين مناطق النشاط الجيني لجينات *Hox* معينة؛ فالحدود الأمامية لنشاط أحد هذه الجينات، *Hoxc6*، يقع في المنطقة العنقية/ الصدرية في الفئران والدجاج والإوز، وذلك بالرغم من أن كلاً من هذه الحيوانات يمتلك عدداً مختلفاً من الفقرات الصدرية. ولذلك فإن الموقع النسبي لنشاط *Hoxc6* قد أزيح في هذه الحيوانات تبعاً لعدد الفقرات (الشكل 6,9). وفي الأفاعي تتبدى الإزاحة أكثر دراماتيكية، إذ لا يوجد لديها حدود عنقية/ صدرية واضحة ونشاط *Hoxc6* يمتد بعيداً إلى الرأس. جميع هذه الفقرات تحمل أضلاعاً، مما يعني أنها فقرات صدرية، لكنها تحوي أيضاً بعض خصائص الفقرات العنقية مما يوحي بأن الأفاعي أصبحت طويلة من خلال فقدان العنق واستطالة الصدر عبر إزاحات في مناطق *Hox*.

إنه من المدهش والمرضي أيضاً اكتشاف أن تطوّر أشكال الجسم في اثنتين من أكثر المجموعات الحيوانية نجاحاً وتنوعاً -المفصليات والفقاريات -قد حدث بآليات متشابهة من إزاحة جينات *Hox* إلى الأعلى والأسفل في محور الجسم الرئيسي. إن الرسالة الأساسية هنا هي أن فهم العديد من التغيّرات الواسعة النطاق في تصميم جسم الحيوان في متناول أيدينا. يمكننا التفكير في أفراد المجموعات -الحشرات والعناكب ومئويات الأرجل والطيور والثدييات والزواحف وأقاربها من الأحافير المنقرضة أيضاً -باعتبارها تفاوتات لكينونة واحدة وليس باعتبارها أشكالاً فريدة الخصائص. لقد سجل دينس ديدرو (Denis Diderot)،



الشكل 9,6 **إزاحة مناطق نشاط *Hox* يصوغ تنوّع الفقاريات أيضاً.** تمتلك الفقاريات المختلفة عدداً مختلفاً من فقرات العنق، فالفئران قصيرة الأعناق والإوزات طويلة الأعناق أما أفاعي البايثون (Pythons) فلا أعناق لها (جذع طويل فقط). يرسم جين *Hoxc6* الحدود بين فقرات العنق والجذع في جميع الحالات، إلا أن موقع الرسم بالنسبة لبقية الجسم يختلف من حيوان إلى آخر. تنمو الأطراف الأمامية على هذه الحدود في جميع الفقاريات رباعيات الأقدام، أزيحت هذه الحدود في الأفاعي بعيداً إلى الأمام لتصبح تحت قاعدة الجمجمة ولم ينم لها أي أطراف (رسم ليان أولدز).

وهو كاتب لامع وفيلسوف من النصف الثاني من القرن الثامن عشر، جوهر هذه الفكرة في ملاحظته التي أوردناها في رأس هذا الفصل، تماماً كما فعل ذلك ويليستون في صياغة قانونه قبل قرن من الزمان. بحوزتنا الآن آلية عامة، وبالتالي تفسير بالغ الأناقة، تصف إحدى أكبر النزعات أو التوجهات في تطور الحيوان.

المفاتيح تصنع الإزاحات

دعونا ننقل هذا الفهم إلى مستوى أعمق من مستوى جينات *Hox* وجغرافيا الجنين ولنسأل: كيف تحدث الإزاحات في مناطق *Hox* والتغيّرات في تشريح الجسم؟

الإجابة هي المفاتيح. فالمفاتيح الجينية لجينات *Hox* هي التي تتحكّم في إحداثيات مناطق *Hox* في الجنين. وتظهر الإزاحات التطوّرية في مناطق *Hox* من خلال تغيّرات متواليات دنا مفاتيح جينات *Hox*.

على سبيل المثال، يحتوي العمود الفقري للفأر على سبع فقرات عنقية وثلاث عشرة فقرة صدرية، بينما يحتوي العمود الفقري للدجاجة على أربع عشرة فقرة عنقية وسبع فقرات صدرية. وتقع الحدود الأمامية لمنطقة نشاط جين *Hoxc8* أبعد في الخلف عند جنين الدجاجة مقارنة بجنين الفأر. يتحكم مفتاح محدد في حدود نشاط *Hoxc8* في جنيني الفأر والدجاجة. والتغيّرات في سلسلة دنا هذا المفتاح بين الفأر والدجاجة مسؤولة عن الاختلافات في المواقع النسبية لنشاط *Hoxc8* في كلا النوعين.

إن تطوّر مفتاح *Hoxc8* بين هذين الصفين من الفقاريات يوضح نقطة حاسمة حول دور المفاتيح في التطوّر. فقد سمح التغيّر في متوالية المفاتيح

بتغيّرات في جغرافيا الجنين دون *إعاقة السلامة الوظيفية لبروتينات عُدّة الأدوات*. وفي الحالة التي نحن بصددها الآن فإن التغيّر في مفتاح *Hoxc8* مكّن من تغيير عدد أنواع معين من الفقرات. يلعب بروتين *Hoxc8* دوراً حاسماً في الأنسجة الأخرى ولذلك فإن التحوّل في متوالية تشفير الجين سيؤثر على الأرجح في جميع وظائفه، أمّا التغيّر في مفتاح معين فإنه يمكّن من تغيير مداول معينة دون التأثير على أجزاء الجسم الأخرى.

إنها الاستراتيجية ذاتها التي تقبع خلف التغيّرات في جغرافيا القشريات أو المفصليات الأخرى التي وصفتها سابقاً. إزاحة نشاط *Hox* للخلف بمقدار فص واحد أو اثنين أو ثلاثة هي مسألة تغيير المفاتيح لتفعيل جينات *Hox* في إحداثيات مختلفة قليلاً دون إعاقة وظيفة بروتين *Hox*.

إعادة التفكير في الحيوانات الكامبرية: احتمالات جينية تعثر على فرصٍ بيئية

يحوي المنظور الجديد المستقى من الإيفوديفو حول التاريخ القديم للحيوانات ثلاثة عناصر مهمة: الأول يشير إلى أن السلف المشترك الأخير بين الفرعين الرئيسيين في الشجرة الحيوانية كان معقداً، جينياً وتشريحياً، إلى حدّ ما بالرغم من الغموض الذي يحيط بها قبل العصر الكامبري فيما يتعلق بالأحافير. والثاني أننا نعلم على نحو مؤكد أن عُدة الأدوات الجينية الكاملة لبناء الجسم كانت موجودة، لكن إمكانياتها لم تكن مستغلة بكثرة لفترة كبيرة من الزمن. والثالث أن إمكانيات عدة الأدوات فُعّلت بكثرة من خلال تطوّر المفاتيح والشبكات الجينية

وإزاحات مناطق *Hox* في العصر الكامبري والعصور الأحدث.

إذا لم يكن ابتكار جينات عدّة الأدوات في حدّ ذاته هو شرارة الانفجار الكامبري، فما الذي كان إذاً؟ أصبح الإدراك الآن يتزايد بأن الانفجار الكامبري كان ظاهرة بيئية، فتطوّر حيوانات أكبر وأكثر تعقيداً قاد إلى تطوّر حيوانات أكبر وأكثر تعقيداً وهلم جراً. وبتقدّم الانفجار العظيم قاد ضغط التفاعل البيئي والتنافس بين أنواع حيوانية متعاظمة التنوّع إلى تطوّر بنى أكثر تعقيداً كالعيون المركبة وأخرى تشبه عدسة الكاميرا للرؤية، وأطراف مفصلية للمشي والسباحة والإمساك بالفريسة، وقلوب للتحكّم بدوران الدم في الأجسام الأكبر، وتشذيب الجسم إلى أقسام رأس وجذع وذيل تسهّل الحركة وتوفّر أنماط دفاع أكثر تعقيداً. تلعب جينات عدة الأدوات دوراً مهماً في مجريات الأحداث هنا، لكنها لا تمثل إلا احتمالات ممكنة وليس مصيراً محتوماً. لقد حيكت الحبكة الكاملة للحدث الكامبري في مقياسها الأوسع من خلال البيئة وتفاعلاتها.

نشأ التنوّع في المجموعات الحيوانية المختلفة خلال العصر الكامبري منطلقاً من حالات مبدئية صغيرة. وحدثت عدّة توسّعات أو «انفجارات صغيرة» بعد الحقبة الكامبرية كانت عادة ما تُعزى إلى استغلال فرص بيئية جديدة. كان اجتياح الأرض من قِبل الفقاريات والمفصليات (والنباتات) متبوعاً بتوسّع انفجاري. وفي العديد من الحالات مُكّنت هذه الاجتياحات بفضل ابتكارات بنيوية: تغيّرات في جغرافيا أجزاء الجسم المفردة تفتح طريقة جديدة للعيش وتهيئ الطريق لانفجارات إضافية. سنتأمل في الفصل القادم بضعة ابتكارات رئيسية صنعت أصنافاً جديدة من الحيوانات.



لعب تطوّر الزوائد الحيوانية دوراً مركزياً في نشوء وتوسّع المجموعات المصوّرة هنا (رسم جايمي كارول)

الفصل 7

انفجارات صغيرة: أجنحة وابتكارات ثورية أخرى

«أتعلم الطيران الآن، لكن لا أجنحة لدي والهبوط للأرض صعب المنال»

توم بيتي (Tom Petty) وجيف لين (Jeff Lynne)
«Learning to Fly» [«تعلم الطيران»] (1991)

ينتابني شعور بالقلق من أدوات المائدة في المناسبات النادرة التي أجلس فيها لتناول الطعام في مطعم فخم، هل هذه شوكة السلطة أم شوكة الطبق الرئيسي؟ أوه، هل استخدمت لتوي شوكة الحلويات لتناول البطاطا المقلية؟ تضج المائدة بسكاكين للزبدة وأخرى للحم وسكاكين للجبن، وملاعق الطاولة وأخرى للشاي والحساء. كيف وصلنا إلى هذه الحالة من فرط التخصّص؟

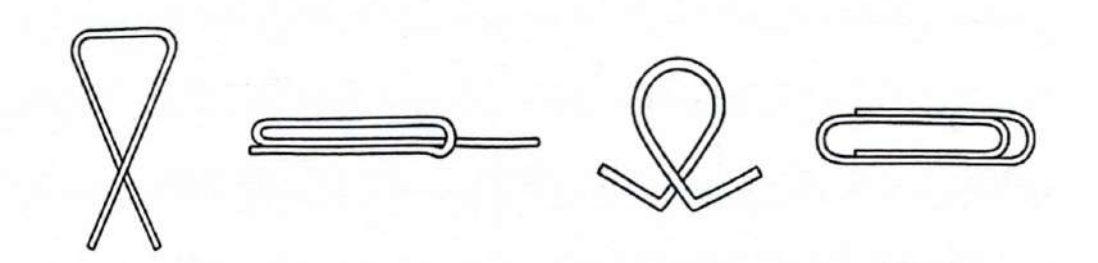
كانت آداب المائدة أكثر بساطة في القرون الوسطى بكل تأكيد لكنها تطوّرت. بدأ الناس باستخدام سكينين للأكل: واحدة لتقطيع الطعام، والأخرى لإرساله إلى أفواههم. ثم ظهرت الشوكة على هيئة شعبتين متجاورتين وكان ذلك أكثر كفاءة من السكين الأحادية الشفرة في التقاط الطعام.

ليس معروفاً على وجه التحديد متى أو أين ظهرت الشوكة لتحل محل السكين الثانية على مائدة الطعام. والله وحده العالم بالعقول الجانحة التي أمطرتنا بكل هذه الأدوات الأخرى على الطاولة. لكنَّ هذه الشذرة من تاريخ أدوات المائدة تناظر نزعة واسعة في تاريخ التطور الأحيائي؛ فالبنى (مثل الشوكة) التي تطوّرت لتتكرّس لوظيفة محدّدة (طعن الغذاء) تُشتق عادة من بنى مسبقة (السكين) كانت تؤدي أكثر من دور (القطع والطعن). مكّن تضاعف البنية الأصلية (استخدام سكينين للأكل) من تقسيم العمل بين بنيتين متغايرين، ويمكن للبنية الجديدة أن تُدخل عليها التحسينات والتخصّصات جرّاء انتقائها لخدمة هدف جديد.

يقدّم تاريخ مشبك الورق الذي لا نعيره كثير اهتمام درساً آخر عن المعاني العظيمة للتطوّر؛ لقد اختُرع في البداية لينافس الدبوس في ربط الأقمشة معاً، وفي وقت لاحق أصبح استخدامه الرئيسي شبك الأوراق معاً. وظهرت الكثير من التصاميم المتفاوتة منذ المشبك الأول وصولاً للتصميم الحديث الواسع الانتشار اليوم. بعض هذه التصاميم مكرّس للإمساك بالجرائد، وبعضها الآخر مصمّم للإمساك برزم الأوراق الأكبر (الشكل 1,7). إن تطوّر مشبك الورق يوضح كيف أن بنية واحدة اخترعت لهدف معين يمكن أن تتطوّر إلى أشكال معينة وتتكيّف

مع وظائف جديدة.

يتشابه تاريخ أدوات المائدة ومشبك الورق مع تطوّر الزوائد الحيوانية. فعندما تحرّرت مجموعات جزئية من الزوائد من بعض مهامها طوّرت أشكالاً ووظائف جديدة مكّنت الأنواع من التنافس في عالم طبيعي يقوم على تنافسية قاسية. بدأ ذلك في المحيطات ثم على اليابسة ولاحقا في الجو. والحبكة اللاحقة في التطوّر كانت عبارة عن «سباق تسلح»، أو حرفياً «سباق أطراف»، والغلبة لمن يجد الأطراف الأفضل أو الأسرع أو الأخف أو الأقوى أو الأكثر رشاقة للسباحة أو المشي أو الركض أو القفز أو التنفّس أو الحفر أو الطيران أو الإمساك أو التحطيم أو البلع أو الوكز أو الترشيح أو الامتصاص أو المضغ.



الشكل 1,7 تطوّر مشبك الورق. مثال على شكل يتكيف من أجل أداء أفضل (رسم ليان أولدز).

كانت هذه الابتكارات تفتتح عادة طرقاً جديدة كلياً للعيش، وهذه الطرق تقود إلى توسّع نوعي سريع أو «انفجارات صغيرة» في التطوّر الحيواني، وتبعت بعض هذه الانفجارات تغيّرات تطوّرية إضافية بعد الاستغلال التام للفرص والإمكانيات التي وفرها الانفجار. لقد زحفت الفقاريات إلى اليابسة على زعانف صدر وحوض محوّرة لأسلافها من

الأسماك، ورغم أنها كانت تمتلك زوجين من الأطراف فقط للعمل بهما، إلا أنها حلقت في الهواء ثلاث مرات منفصلة لتنتج أنواعاً مختلفة من الحيوانات (التيروصور (pterosaurs) والطيور والخفافيش) وعادت إلى الماء عدة مرات (الحيتان والدلافين والفقمات وغيرها)، كما طوّرت جميع أنواع الأطراف لشقّ طريقها على اليابسة. وعندما توقّف سلف الإنسان عن المشي على أطرافه الأربعة وانتصب على قدميه قبل ملايين السنين ظهرت فرص جديدة لأطرافنا الأمامية. وصار بإمكان ذراعيه وقد تحررتا من عبء حمل الجسم أن تنفّذا العديد من الأنشطة مثل صناعة الأدوات والصيد والتواصل، وأخيراً إنتاج سجلات رمزية للعالم الطبيعي. وقد ساند هذه الأنشطة في تطوّرُ أدمغة أكبر وأسرع، وساهمت بدورها في دفعه، وتطلّب ذلك تطوّراً أكبر في الهيكل العظمي لحمل الذرية كما تطلب أيضًا نظاماً عائلياً لتمديد فترة العناية بهم.

تكمن أهمية تصميم الجسم المتكرّر تسلسلياً في قدرته على إزاحة عبء بعض المهام من زوجين من البنى أو أكثر وإحالتها إلى عدد أقل من الأزواج، ثم تخصيص البنى المتحرّرة لتخدم أهدافاً جديدة. لقد خدم ذلك الفقاريات جيداً لكن المفصليات أفرطت بكل تأكيد في اعتماد هذه الفكرة. فبالرغم من أن جميع أطراف المفصليات تظهر نوعاً عاماً من التصميم، إلا أنها طوّرت طيفاً لا يصدق من التفاوتات في هذا التصميم. في مثال تطور الأقدام الفكّية للقشريات الذي أوردته في الفصل السابق، حرّر تطوّر هذه البنى الجامعة للطعام الزوائد الصدرية من عبء الانتقاء والإطعام، وسمح لها بالتكيّف مع أنواع جديدة من الحركة مثل المشي والسباحة والحفر. وفتح هذا بدوره فرصاً تم استغلالها خلال انفجار

تطوّر القشريات.

إن الفكرة الجوهرية التي تعلمناها من تنويع البنى المكرّرة تسلسلياً، وخاصة الأطراف، هي كيفية حدوث التحوّلات التطوّرية. لقد ظل فهم كيفية ظهور التغيرات الرئيسية في الماضي البعيد أحد أقوى التحديات القائمة أمام علم الأحياء التطورية. وكانت الفكرة الخاطئة التي يرفعها المعسكر المعارض لنظرية التطوّر هي أن المراحل الوسيطة في تطوّر البنى يجب أن تكون عديمة الفائدة إشارةً إلى تلك المقولة القديمة: «ما فائدة نصف قدم أو نصف عين؟» ويتبع ذلك «منطق» منافٍ للعقل خلاصته أنه يجب أن تصنع البنى كاملة من الوهلة الأولى، وبالتالي فإن التطوّر لم يحدث. تتشبث وجهة النظر هذه باستماتة بالملاحظات التي طرحها داروين نفسه حول الصعوبات التي تواجه نظرية الانتخاب الطبيعي في كتابه أصل الأنواع. لكن وجهة النظر هذه تخفق دائماً في فهم نظرة داروين الكلية والعبقرية للموضوع أو في الإشارة إليها. فقد نظر إلى الأمر من خلال منظور دقيق مفاده أن العضو ذاته يؤدي عادة وظيفتين مختلفتين كلياً في الوقت ذاته، وأنه يمكن لعضوين مختلفين أيضاً أن يساهما في الوقت ذاته في أداء الوظيفة ذاتها. يتيح هذا التعدّد الوظيفي (multifunctionality) والحشو[1] (redundancy) الفرصة لتطوّر التخصّصية من خلال اقتسام المهام. ويمكّن توفر بنى متكررة الحيوانات من «امتلاك الكعكة وأكلها أيضاً» أو بعبارة أدق «امتلاك الأطراف فيما تتعلم الأكل بها أيضاً».

سأسلط الضوء في هذا الفصل على قدرة الإيفوديفو على كشف الاستمرارية (continuity) بين البنى التي تكيّفت مع أهداف مختلفة

(1) وجود بنى مكررّة تؤدي الوظيفة ذاتها. المترجمان

جداً وتحديداً في المفصليات. ولأن هذه الاستمرارية كانت دائماً مخفية بسبب الاختلافات بين الأشكال، لم يستطع علماء الأحياء في السابق التأكّد من طبيعة العلاقة بين البنى المختلفة في المجموعات المختلفة مثل خياشيم القشريات المائية وزوائد مفصليات اليابسة. لكن أصبح ذلك ممكناً بفضل الطرق والأفكار الجديدة التي منحنا إياها علم الإيفوديفو. سأركّز على الكيفية التي تحوّلت بها أطرف المشي الأنبوبية في فصّيات الأرجل الكامبرية إلى زوائد مفصلية عالية الكفاءة للسباحة والمشي والتنفّس في القشريات، وخياشيم في الحشرات المائية، وأجنحة في حشرات اليابسة، ورئات كتابية[1] (book lungs) ومغازل (spinnerets) في العناكب. لم تُخترع هذه البنى من الصفر، بل هي في حقيقة الأمر تنويعات على تصميم طرف بدائي.

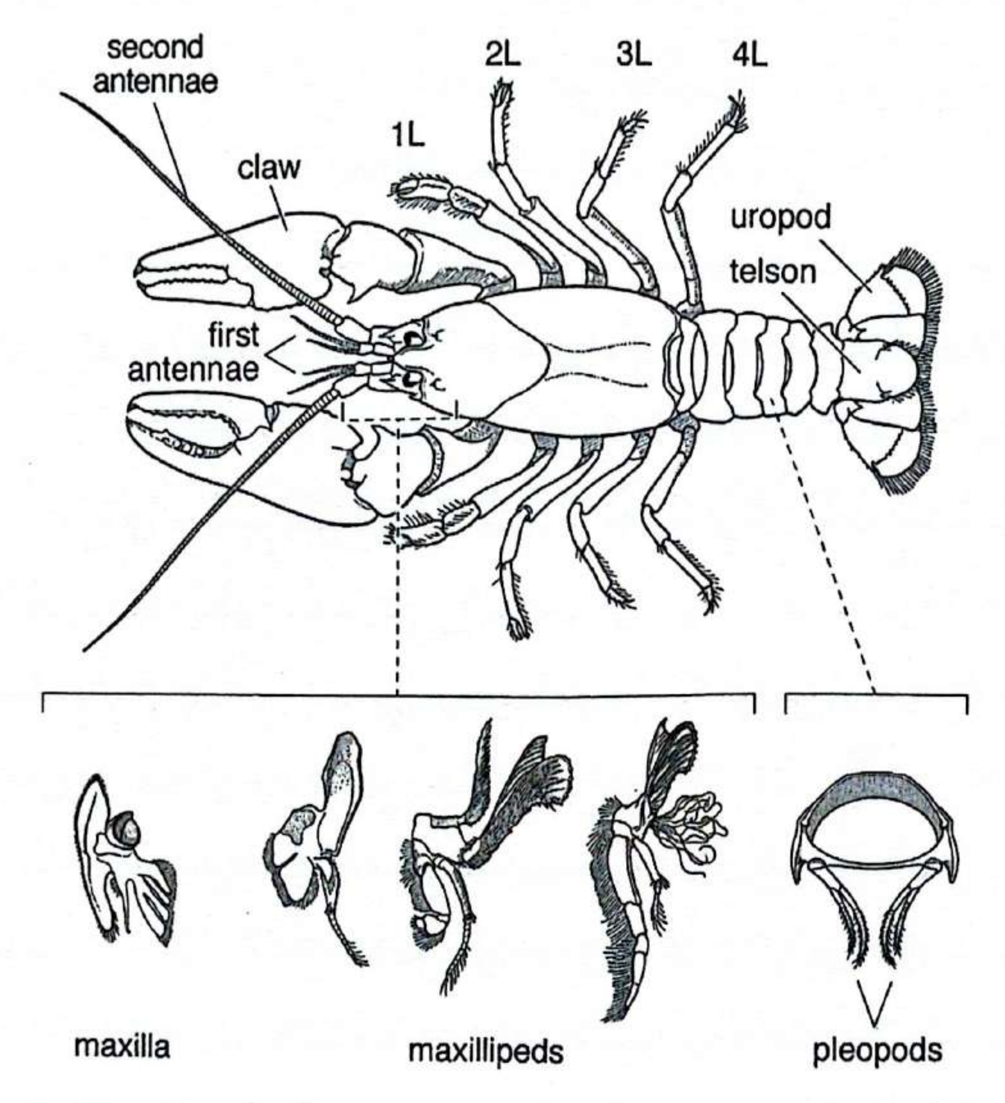
إن إعادة قولبة الأطراف لتظهر بأشكال ووظائف جديدة هو نتاج تغيير في جغرافيا نموّ الطرف. سأعرض كيف أن تغير الجغرافيا مكّن الحشرات من الطيران ومكّن من تطوّر أساليب جديدة في الطيران، كما مكّن الفقاريات من الخروج إلى اليابسة، والأفاعي والمجموعات الأخرى من التكيّف مع بيئات جديدة.

الانطلاق من البساطة: الأطراف ثنائية التفرّع

تطوّرت في المفصليات تشكيلة مذهلة من الزوائد متعدّدة الاستعمالات انطلاقاً من بداية متواضعة لتصميم طرف في سلف ما. وظهرت في الوقت ذاته عدة زوائد في النوع الواحد تتوفر على مهارة

(1) الرئة الكتابية هي عضو تنفس يشبه الكتاب يوجد في العنكبوتيات. المترجمان

شبيهة بمهارة الأداة بالإضافة إلى كونها أسلحة وحشية. ألق نظرة على الأدوات المختلفة التي يحملها جراد البحر البسيط (الشكل 2,7)، إنه يحوز من الأدوات أكثر مما يوجد في سكين الجيش السويسرية الفاخرة.

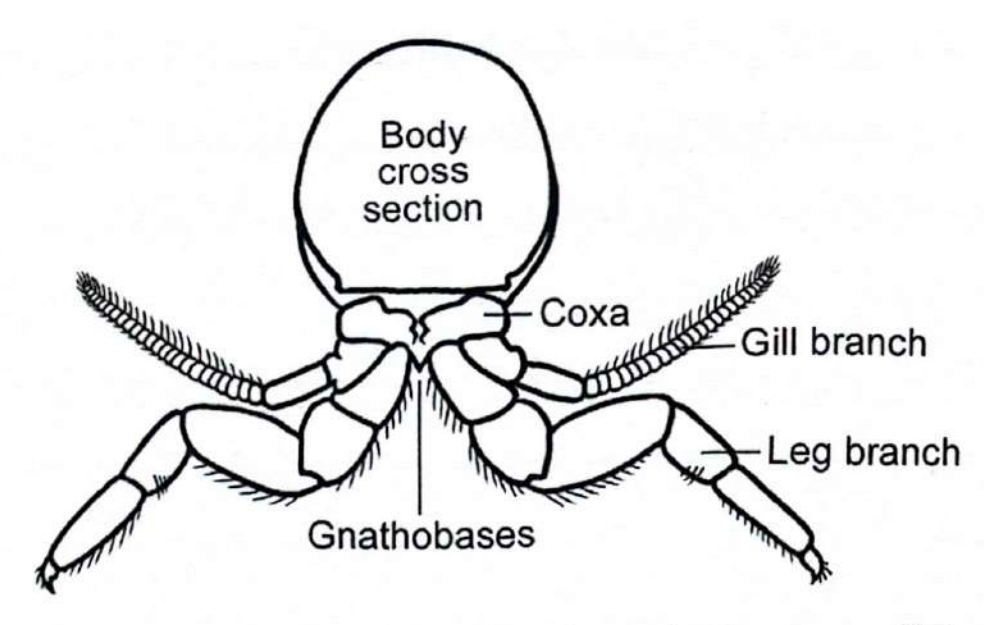


الشكل 2,7 **التنوّع العظيم في الزوائد لدى جراد البحر وهو أحد أنواع المفصليات.** تخرج من هذا الحيوان أربعة عشر نوعاً مختلفاً أو أكثر من الزوائد تتضمن مجموعتين من قرون الاستشعار وأربع مجموعات من الأرجل وثلاث مجموعات من الأقدام الفكّية وعدة أزواج من الأقدام الشراعية (زوائد السباحة البطنية). وجميع هذه الزوائد أُشتقت من تصميم سلف مشترك (نقلاً عن كتاب «تشريح المفصليات» (.R. E. Snodgrass (*Arthropod Anatomy*. Comstock Publishing Associates. 1952) إعادة رسم ليان أولدز).

برزت مورفولوجيا الطرف بوضوح في العديد من النقاشات التي تتناول تطوّر المفصليات. وقد سُلطت أضواء جديدة على أصل البنى وتطوّرها من خلال تضافر مصدرين: علم الأحافير الذي كشف وفسر أحافيرَ أساسية، حيث أدى التقدّم في دراسة العلاقات بين الحيوانات إلى إعادة ترتيب بعض الأفرع في شجرة المفصليات، وعلم الإيفوديفو الذي وفّر نوعاً جديداً من الأدلة الحاسمة.

تدور قصة تطوّر أطراف المفصليات بأكملها حول نشوء طرف ثنائي التفرع (كشوكة الطعام الأولى) في الأسلاف، وحول التعديلات التي طرأت عليه لاحقاً. يظهر الشكل 3,7 مقطعاً عرْضياً للأجزاء الأساسية في تصميم هذا الطرف الذي يُشاهد لدى ثلاثيات الفصوص والقشريات، ويُظهر كيف يتفرّع الفرعان الرئيسيان للطرف من القاعدة ذاتها. يشكل الفرع الداخلي رجل المشي المفصلية بينما يقوم الفرع الخارجي بعدة أدوار. وجميع أنواع الفروع والامتدادات الأصغر ذات الوظائف المتخصصة [173] التي تطوّرت في عدة أنواع حيوانية خرجت إما من القاعدة أو الفرع الداخلي أو الخارجي. الأجزاء التي خرجت من القاعدة على سبيل المثال تخصّصت في الإمساك بالطعام أما تلك التي خرجت من الفرع الخارجي فكانت الخياشيم التي تتبادل المفصليات المائية بواسطتها الأكسجين وثاني أكسيد الكربون.

هناك احتمال كبير أن تكون أطراف المفصليات الأكثر ألفة بالنسبة لك هي الأرجل المفصلية غير المتفرّعة في الحشرات. هذه الأطراف الاستثنائية هي البنى الأبسط من بين ترسانة المفصليات من الزوائد. وقع علماء الأحياء ببساطة في خطأ الاعتقاد بأن الأرجل البسيطة



الشكل 3,7 **تصميم الطرف ثنائي التفرّع**. المنظر الخلفي لطرف متفرّع نموذجي، حيث يدخل الفرع العلوي في عملية التنفس ويدخل الفرع السفلي في عملية الحركة(نقلاً عن كتاب «حياة مدهشة» (S.J. Gould. *Wonderful Life*. W. W. Norton. 1989)، إعادة رسم ليان أولدز).

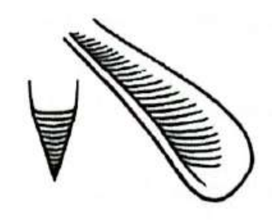
للحشرات ومئويات الأرجل وألفيات الأرجل وحاملات المخالب تجمع هذه الحيوانات في مجموعة واحدة منفصلة عن القشريات وثلاثيات الفصوص والعقارب وسرطانات حدوة الحصان التي يجمعها جميعاً تلك الزوائد الجميلة ثنائية التفرّع. وكان ذلك أحد التصوّرات التقليدية في الوقت الذي كتب فيه جود كتابه [حياة مدهشة] *Wonderful Life*.

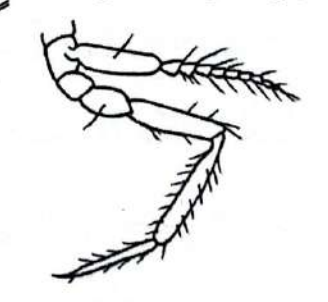
لكن ذلك غير صحيح، لا أسرد ذلك لحشو رأسك بالأفكار الخاطئة، ولكن لأضرب لك مثالاً على أن الاعتماد الحصريّ على الشكل قد يفضي أحياناً إلى فهم خاطئ لتاريخ التطوّر الحيواني. لقد خَلُص أحد علماء الأحياء البارزين والمؤثرين من ذوي المعرفة الموسوعية بالمفصليات إلى أن الحيوانات ذوات الأطراف غير المتفرّعة (أحادية التفرع) كانت جميعها مختلفة عن تلك التي تمتلك أطرافاً متفرّعة (ثنائية التفرّع) بحيث

أنها يجب أن تكون قد ابتكرت أطرافها باستقلالية عن الأخرى وتنتمي بالتالي لشعبة مختلفة وليس لمجموعة واحدة هي المفصليات.

خلافاً للفكرة السابقة عن النشوء المنفصل للأطراف المتفرّعة وغير المتفرّعة، تشير الأدلة إلى أن الأطراف ثنائية التفرّع قد تطوّرت من الأرجل الفصية البسيطة الأنبوبية لفصّيات الأرجل. ويبدو أن هناك سلسلة من الابتكارات مرت بها أسلاف المفصليات بدأت برجل فصية بسيطة لحيوان مثل *آيشيا*، حيث عمدت حيوانات بأطراف فصية خارجة من الأجزاء السفلى من فصوص جسمها إلى تطوير فصوص علوية منفصلة ربما أدّت وظائف شبيهة بوظيفة الخياشيم، كما يشاهد في النوع *أوبابينيا*، والتحم لاحقاً الطرفان العلوي والسفلي معاً من جهة القاعدة لتشكيل رجل مشي فصية مفصلية في أسلاف المفصليات (الشكل 4,7). يأتي أحد المصادر الجديدة التي تدعم هذا التصوّر من الإيفوديفو. فالأرجل الفصية لحاملات المخالب وجميع فروع أطراف المفصليات تُنشّط جين بناء الأطراف *Dll*، ويتفق هذا مع فكرة أن جميع أنواع أطراف المفصليات المتفرعة وغير المتفرّعة تطوّرت من رجل فصية غابرة عوضاً عن ابتكارٍ منفصل لنوعين من الأطراف.







الشكل 4,7 المراحل الثلاث لتطوّر الطرف. امتلكت بعض حاملات المخالب أرجلاً فصية غير متفرّعة وامتلكت الأخرى أرجلاً ثنائية التفصص يبدو أنها التحمت معاً لتطوير الأطراف المفصلية ثنائية التفرّع في المفصليات (رسم ليان أولدز)

تعلم الطيران:

من عدّة خياشيم إلى زوج أجنحة

إن التعدّدية الوظيفية للأطراف المتفرّعة للمفصليات المائية هي المفتاح لفهم التحوّلين الرئيسيين اللذين مرت بهما المفصليات: المشي على اليابسة، والتحليق في الجو. يؤدّي فصّ على الفرع العلوي من الطرف في القشريات المائية وظيفةً تنفسية فيما يتخصّص الفرع السفلي من الطرف في السباحة أو المشي، أما مفصليات اليابسة فجميعها تمتلك أطرافاً غير متفرّعة للمشي، وهذه حالة مبسّطة تطوّرت من خلال تقليص الزائدة المعقّدة الثنائية التفرّع في سلف ما إلى الفرع الداخلي فقط.

ساعد هذا على فهم أصل أقدام الحشرات، لكن ماذا عن الأجنحة؟ لقد ظل نشوء أجنحة الحشرات لغزاً مثيراً للجدل فترة طويلة. وجادل بعض علماء الأحياء بأن الأجنحة ظهرت بمثابةناميات مستقلة من الجدران الصدرية للجسم في حشرات بلا أجنحة. هناك نظرية أخرى مفادها أن الأجنحة اشتُقّت من أحد الأفرع في رجل سلف ما وتحديداً من خياشيم سلف مائي. ولقد تردّد علماء التشريح المقارن بين هذين الطرحين ردحاً طويلاً من الزمن دون حسم الأمر.

هنا يتدخّل علم الإيفوديفو مرة أخرى حاملاً بعض الأدلة الجديدة الحاسمة، فقد حدّدت دراسات نموّ الأجنحة في الحشرات، وخصوصاً الذباب، بضعة بروتينات يتطلبها بناء الأجنحة. اثنان منها ينتميان لبروتينات عدّة الأدوات: الأول يعرف باسم عديم الأجنحة (Apterous) (طافرات هذا الجين تفتقر إلى الأجنحة)، والثاني باسم

النتوء (Nubbin) (طافرات هذا الجين لديها نتوءات أجنحة صغيرة). تعقب ميكاليس أفّيروف وستيفن كوهن (Stephen Cohen) كيف ينشط بروتينا عديم الأجنحة والنتوء في زوائد المفصليات الأخرى وخصوصاً القشريات بُغيةَ اختبار نظرية اشتقاق الأجنحة من الخياشيم في القشريات. ووجدا أمراً لافتا للنظر وهو أن البروتينين ينشطان في الفص التنفّسي في الفرع العلوي من أطراف القشريات. إن التفسير الأفضل لهذه المشاهدة هو أن الفصّ التنفّسي وأجنحة الحشرات أعضاء متناددة، أي أنها الجزء ذاته من الجسم بشكلين مختلفين في حيوانين مختلفين. والبديل المحتمل الآخر لهذا التفسير هو أن تكون هناك مصادفة استثنائية أدت إلى اختيار هذين البروتينين، من بين مئات بروتينات عدة الأدوات التي يمكن أن تستخدم لبناء الأجنحة والخياشيم، من قبل القشريات والحشرات كل على حدة لإنشاء هذه البنى. إن السيناريو الأكثر احتمالية هو أن يكون بروتينا عديم الأجنحة والنتوء قد استخدما في صناعة الفصوص التنفّسية في السلف القشري المائي للحشرات، وبقيا في وظيفتهما منذ ذلك الحين، فيما كان هذا الجزء من الطرف المتفرّع يتطوّر إلى جناح (وإلى بنى أخرى في حيوانات مختلفة كما سنرى ذلك لاحقاً). في الحشرات إذاً انفصل الفرعان الخارجي والداخلي في طرف السلف وتحرّك الطرف الخارجي إلى الجزء العلوي من الجسم ليتطوّر إلى جناح، بينما تطوّر الفرع الداخلي ليصبح رجل مشي غير متفرّعة.

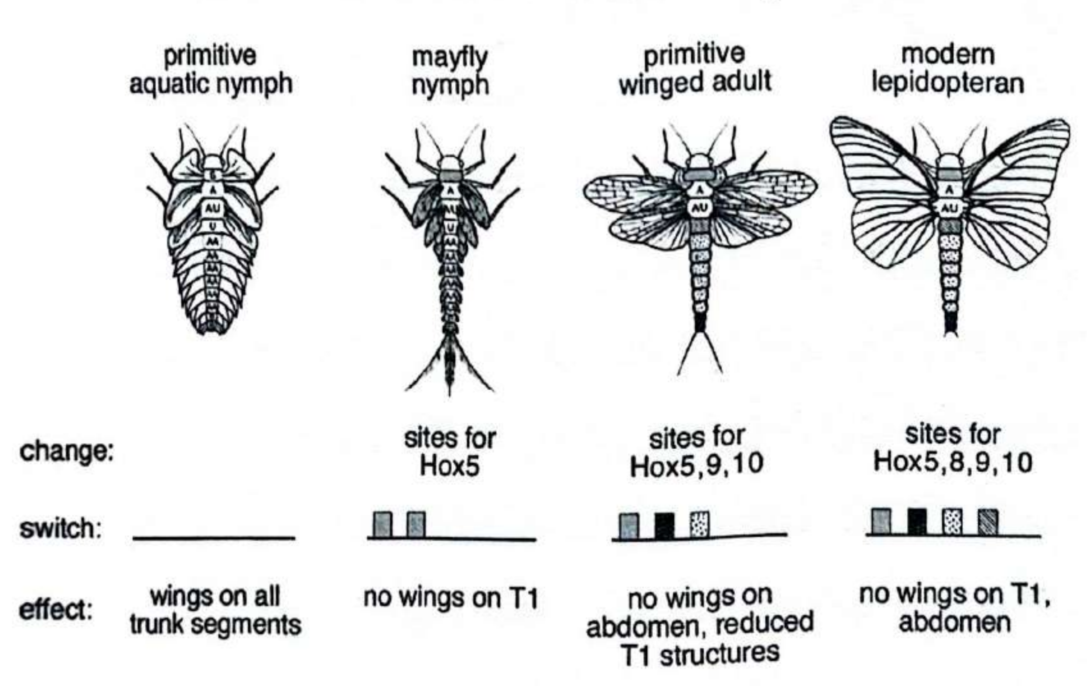
تتوفّر نظرية «من الخياشيم إلى الأجنحة» دائماً على أدلة تدعمها (إلا أنها لا تمتلك الثقل الكافي لحسم المسألة). لكن إذا كانت أجنحة

الحشرات جاءت بالفعل من فرع خياشيم القشريات فهل يعني ذلك أن بعض أنواع جراد البحر أو الروبيان زحفت إلى اليابسة ثم بدأت بالطيران؟ لا، بكل تأكيد، فهناك العديد من الخطوات التطوّرية في الانتقال بين الحيوانات التي تحمل مجموعة من الزوائد التنفّسية وبين نشوء الحشرات المزوّدة بقوة الطيران باستخدام زوجين من الأجنحة كما نعرفها الآن. بعض أهم الدلائل المساعدة على إعادة بناء هذه المراحل الانتقالية تأتي من أحافير الحشرات المنقرضة منذ أمد بعيد، بالإضافة إلى إضاءات أكثر من الإيفوديفو. وكان لمختبري دور في هذه القصة وهي واحدة من المناسبات التي تجتمع فيها المعارف الجديدة من الأحافير والجينات والأجنة لبناء رؤية مقنعة.

إن بعضاً من أكثر أحافير الحشرات غنىً بالمعلومات لا تشبه أي شيء مما نعرفه اليوم. لقد فاجأني ذلك شخصياً عندما طالعت للمرة الأولى رسماً لأحفورة «حورية الماء البدائية» التي تظهر في الشكل 5,7 (إلى اليسار). درس عالما الأحافير روبن ووتون (Robin Wootton) وجارميلا كوكالوفا بيك (Jarmilla Kukalova-Peck) هذا الكائن الذي عاش قبل أكثر من 300 مليون سنة. وسمته الأكثر أهمية هي امتلاكه بنى تشبه الأجنحة على جميع فصوصه الصدرية والبطنية. يعكس نمط القنوات على هذه الزوائد هذه السمة حيث تشبه النمط العام للعروق في أجنحة الحشرات. إلا أن هذه الأحفورة تعود لحيوان مائي وهذه ليست أجنحة بل خياشيم تشبه تلك الموجودة اليوم في أطوار الحورية المائية في اليعاسيب (dragonflies) وذبابات النوّار.

إن السيناريو الأرجح لأصل الأجنحة هو أن أجنحة حشرات

اليابسة البالغة تطوّرت من حيوانات كانت تمتلك خياشيمَ في المرحلة اليرقية. ويمكن للأجنحة بعد ذلك أن تتطوّر بمثابة بنى بالغة تم تعديلها من الخياشيم دون الاستغناء عن الخياشيم تماماً. لقد نمت اليعاسيب وذبابات النوّار من حوريات مائية غير بالغة امتلكت خياشيمَ في منطقة البطن وهذه الأجنحة هي الأجنحة الأكثر بدائية عند الحشرات. إن وجود مراحل منفصلة في دورات حياة الحيوان خلقت قدراً عظيماً



الشكل 5,7 تطوّر عدد الأجنحة وشكلها. امتثل عدد الأجنحة لقانون ويليستون، حيث تطوّر من سلسلة من الزوائد الشبيهة بالخياشيم في جميع الفصوص في أشكال الحوريات المائية المنقرضة إلى عدد أصغر ثم إلى بنى مقلّصة في ذبابات النوّار ثم إلى زوجين من الأجنحة في أغلب الحشرات الحديثة. وقد تقلّص عدد الأجنحة تدريجياً من خلال تطوّر مواقع متزايدة لبروتينات *Hox* في مفاتيح الجينات المنمّية للأجنحة (رسم ليان أولدز).

من الفرص للتطوّر. فكر في الأمر: اليعاسيب وذبابات النوّار البالغة حيوانات مختلفة كلياً عن صغارها المائية وتعيش في بيئة مختلفة تماماً. لقد تكيّف جينوم واحد في الوقت ذاته ليتناسب مع هذه البيئات المختلفة من خلال فصل البرامج النمائية لبناء شكل الحورية عن تلك التي تبني شكل الحيوان البالغ. وتطور أشكال يرقية وأشكال بلوغ مختلفة جذرياً ظاهرة منتشرة في الحيوانات (تأمل اليساريع (caterpillars) والفراشات البالغة أو يرقات شوكيات الجلد ثنائية الجانب والشكل البالغ منها شعاعي خماسي (pentaradial)).

ساعد هذا السيناريو في شرح عملية الانتقال من الخياشيم إلى الأجنحة، لكن ماذا عن عدد الأجنحة؟ خلصت دراسات الديناميكا الهوائية إلى أن زوجين من الأجنحة يتموضعان على الفصين الصدريين الثاني والثالث يوفران أفضل الخصائص الأدائية، كيف تمكّنت الحشرات من الوصول إلى هذا التصميم الأمثل؟

لنعد إلى قانون ويليستون وجينات *Hox* والمفاتيح، ولنتذكر النزعة التي تتلخص في أن التخصصية عادة ما تترافق مع تقليص عدد البنى المتكرّرة تسلسلياً. ينطبق هذا تماماً على تطوّر عدد أجنحة الحشرات. فقد وُجدتْ في السجل الأحفوري أشكال منقرضة تمتلك أجنحة أقل أو أصغر أو بنى شبيهة بالأجنحة في البطن والفص الصدري الأول. تمثل هذه الأشكال كائنات وسيطة بين الأشكال المائية البدائية والأصناف الحديثة (الشكل 5,7). وكان تقليص عدد الأجنحة مسألة تقليص وإزالة تشكل الأجنحة خلال النموّ من جميع الفصوص عدا الفصين الصدريين الثاني والثالث.

كيف كُبتت الأجنحة في النمط الخاص بفص ما؟ إن الفصوص التي اختفت منها الأجنحة هي مناطق بروتينات *Hox* معينة في جميع الحشرات. وقد اكتشف سكوت ويذربي (Scott Weatherbee) وجيم لينجلاند (Jim Langeland) في مختبري أن تشكّل الجناح يُكظم في الذباب في هذه الفصوص من خلال بروتينات *Hox* التي تنشط فيها. وهذا يخبرنا أن الحالة الحديثة من امتلاك الحشرات زوجين من الأجنحة هي نتيجة تطور عملية كظم تشكّل الجناح بواسطة بروتينات *Hox* التي تعمل في الفص الصدري الأول وجميع الفصوص البطنية. لا بد أن هذا الكظم قد حدث على مراحل في المجموعات المختلفة من الحشرات الغابرة لأن السجل الأحفوري يحوي أنواعاً يظهر فيها كظم الجناح جزئياً. والسبب الأدقّ لكظم الأجنحة هو أن مفاتيح الجينات التي تنغمس في تشكيل الجناح طوّرت متواليات توقيعية لبروتينات *Hox* أدت إلى إيقاف هذه الجينات في الفصوص المختارة.

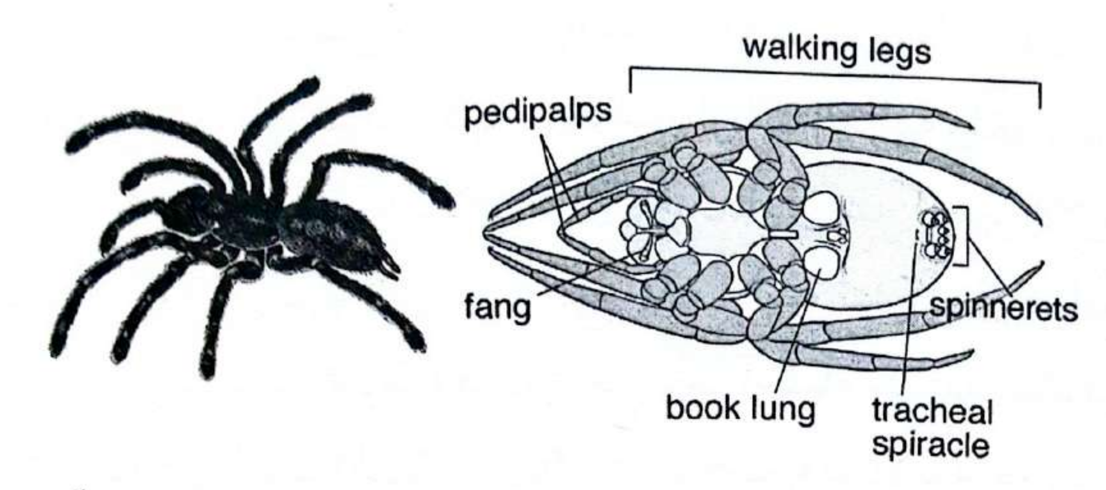
حكايات العنكبوت:
مزيد من تكيّفات خياشيم المفصليات

ليست الحشرات رغم نجاحها الباهر المجموعة الوحيدة من المفصليات التي استعمرت الأرض وعمرتها. فالعناكب تكيّفت أيضاً للعيش على اليابسة متطوّرة من فرع مختلف في المفصليات يعرف بالكُلّابيات (chelicerates)، وهي تمتُّ بصلة أكبر للعقارب والسوس (mites) وسرطان حدوة الحصان.

ومثلما فعلت الحشرات، استطاعت العناكب الانتقال إلى اليابسة عبر

تغيير أساليبها في التنفّس والحركة والتكاثر والإمساك بالطعام مقارنة بأسلافها المائية. طوّرت العناكب ما يعرف بالرئات الكتابية والقصبات الهوائية للتنفّس على اليابسة بالإضافة إلى المغزل الذي ينتج الحرير اللازم لصناعة الشبكة وصيد الفرائس. جميع هذه الأبنية تتشكل في مواقع متشابهة من فصوص مختلفة وذلك يوحي بأنها أعضاء متناددة تسلسلياً بالنسبة لبعضها بعضاً (الشكل 6,7). تُنشّط جميع هذه الأبنية جين *Dll* الباني للأطراف خلال التشكل، ما يشير إلى أنها زوائد معدّلة، لكن أي زوائد بالتحديد؟

يضع الإيفوديفو ثقله مرة أخرى للإجابة عن سؤال يبلغ عمره قرناً من الزمان، لقد وجد ويم ديمن (Wim Damen) وتيدورا ساريداكي (Theodora Saridaki) وميكاليس أفّيروف أن جميع هذه البنى تُنشّط عديم الأجنحة والنتوء؛ بروتيني عدة الأدوات اللذين ينشطان في فرع الخياشيم في القشريات المائية وأجنحة الحشرات. وهذا دليل مقنع على أن الرئات الكتابية والقصبات الهوائية والمغازل اشتُقّت أيضاً من فرع الخياشيم في سلف مفصلي. ووجدوا أيضاً أن الخياشيم الكتابية في سرطانات حدوة الحصان تنشّط هذين البروتينين. هذه البنى اشتُقّت أيضا من فرع الخياشيم في سلف ما. وتوحي هذه المشاهدات بناء على القرابة بين العناكب وسرطانات حدوة الحصان أن الخياشيم الكتابية عُدّلت خلال تطوّر العناكب إلى رئات كتابية وقصبات هوائية ومغازل من أجل تكيّفها على اليابسة.

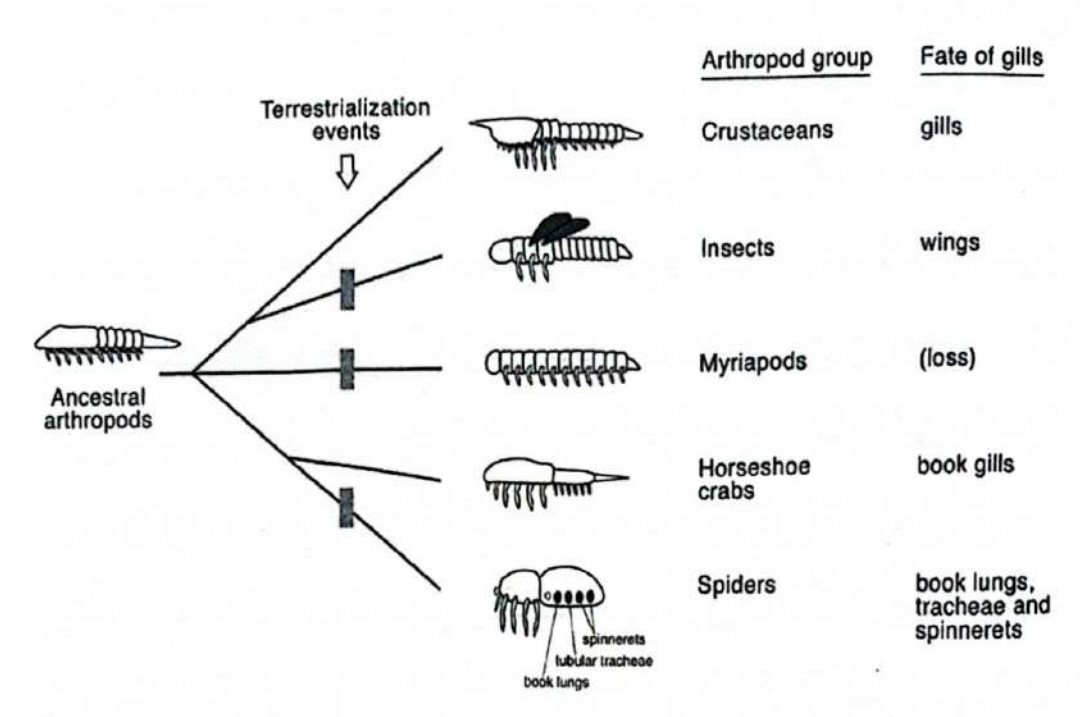


الشكل 6,7 **العناكب وابتكاراتها**. كان تكيّف العناكب مع اليابسة مصحوباً بتطوّر الرئات الكتابية والقصبات الهوائية والمغازل من فرع الخياشيم في زوائد الأسلاف المائية. جميع هذه البنى أعضاء متناددة تسلسلياً لأجزاء الفم (pedipalp) وأرجل المشي (رسم ليان أولدز)

تقدم لنا هذه الأدلة بالإضافة إلى أدلة اشتقاق أجنحة الحشرات من فرع الخياشيم في القشريات صورة مبهرة، فجميع ابتكارات اليابسة تعديلات على جزء من تصميم طرف ثنائي التفرّع في سلف مشترك (الشكل 7,7). وهذا التصميم ذاته كان قد اشتُق على الأرجح من رجل فصية غير مفصلية وفصّ خيشومي جانبي في فصيات الأرجل. إن جميع أدوات المفصليات -المخالب والأرجل وأطراف السباحة والفك العلوي والأقدام الفكّية والخياشيم والرئات الكتابية والقصبات الهوائية والمغازل والأجنحة -نتاج تعديلات على تصميم في سلف مشترك.

لعلك بدأت الآن رؤية ثيمة عامة في التطوّر: لا تخترع الطبيعة عادة الأشياء من الصفر، إنها تعيد قولبة بناها الناجزة باستخدام جينات عدّة الأدوات المتوفّرة. وهكذا فقد صاغت بنى متخصّصة مكّنت الأنواع الحيوانية من اجتياح أنظمة بيئية مختلفة تماماً عبر تطويرها لتصاميم

جسم جديدة ومختلفة تماماً من زوائد مكرّرة متعددة الوظائف للأكل والسباحة والتنفّس والمشي في المفصليات المائية.



الشكل 7,7 **التكيّفات العديدة لفروع الخياشيم في المفصليات.** تطوّرت أجنحة الحشرات وخياشيم سرطان حدوة الحصان الكتابية وعدّة بنى للعناكب من أفرع الخياشيم في القشريات المائية. يُظهر هذا التفاوت المذهل في البنى ميزةَ امتلاك بنى مكرّرة تسلسلياً يمكن تخصيصها لمهام معينة. (تقدمة ميكاليس أفّيروف، مكيّفة عن .Damen et al. (2002) *Current Biology* 12:1711، أعيد طبعها بإذن من ألسيفير).

تطور جغرافيا الزوائد

بالرغم من أن جميع زوائد المفصليات التي وصفتها قد اشتُقّت من تصميم مشترك في سلف ما، إلا أنها ليست متطابقة في الشكل. فأعضاء العنكبوت المتنادة تسلسلياً، المغازل والقصبات الهوائية والرئات الكتابية، على سبيل المثال تظهر في الحيوان ذاته لكنها تمتلك جغرافيات مختلفة. أضف إلى ذلك، رغم أن الأجنحة قد اشتُقّت أيضاً من تصميمٍ

مشترك في سلف ما إلا أنها تتغاير دراماتيكيا في الأنواع المختلفة. إذاً يجب أن نتمكّن من تفسير الكيفية التي تنمو فيها الجغرافيات المختلفة للبنى المتناددة تسلسلياً في الحيوان ذاته، وأيضا كيفية تطورّها في الأنواع المختلفة.

جينات *Hox* هي المفتاح مرة أخرى. نعرف، على سبيل المثال، أن الفصوص التي تحمل الرئات الكتابية والقصبات الهوائية والمغازل في العناكب تقع داخل مناطق مختلفة ينشط فيها جين *Hox*. وهذا مظهر آخر من مظاهر قانون ويليستون. فقد كُرّرت الخياشيم الكتابية تسلسلياً في الأسلاف المائية لكن العناكب شهدت تخصيص الزوائد في الفصوص المجاورة. تنمو الرئات الكتابية في مناطق جين *Hox 7*، والقصبات الهوائية في مناطق *Hox 7* و8 ، والمغازل في مناطق جينات *Hox 7* و8 و9. إن الاختلافات بين هذه الأبنية ناشئةٌ عن تأثير التوافقيات المختلفة لبروتينات *Hox* على مفاتيح الجينات التي تنمّط الزوائد.

يعتمد تطوّر جغرافيا الزائدة ذاتها في الأنواع المختلفة على جينات *Hox* أيضاً، لكن بالنسبة لأي زائدة يحدث التطوّر في الشكل مع استمرار بقاء بروتين *Hox* ذاته، وأجنحة الحشرات الخلفية مثال جيد على ذلك.

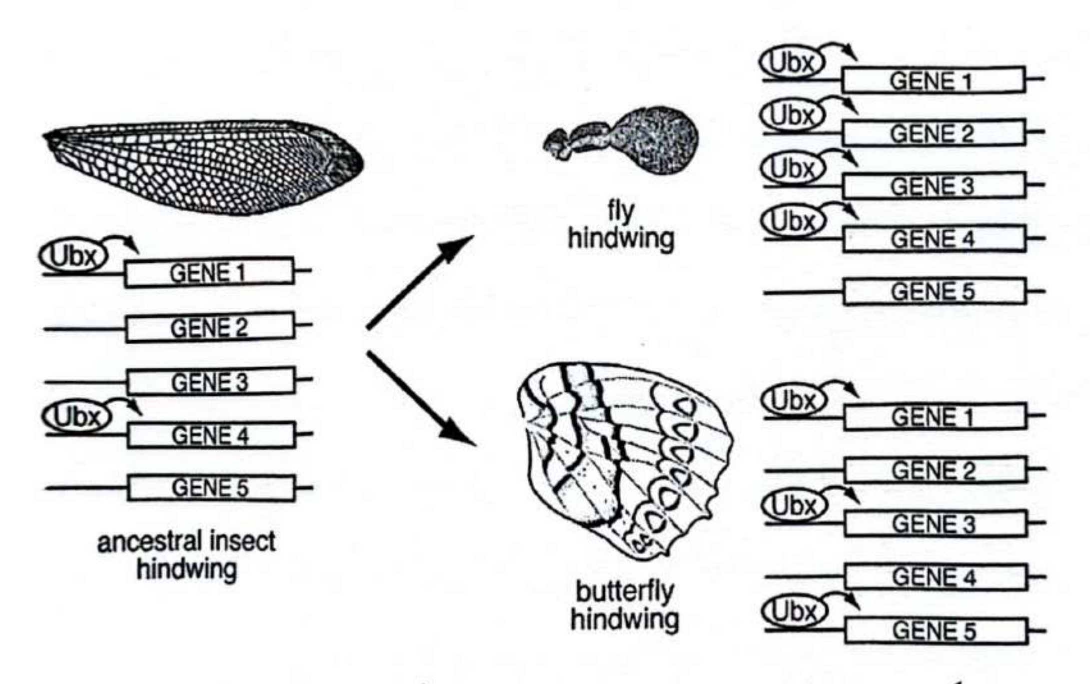
لم ينته تطوّر الأجنحة في الحشرات بصناعة النمط رباعي الأجنحة. يبدو زوجا الأجنحة في أوائل الحشرات الطائرة وفي المجموعات الأكثر بدائية التي ما زالت تحلق اليوم (مثل اليعاسيب وذبابات نوار) شديدي الشبه أحدهما بالآخر. لكن هذين الجناحين طَوّرا اختلافات كبيرة في الحجم والشكل والملمس واللون والوظيفة في مجموعات الحشرات اللاحقة. ففي الخنافس على سبيل المثال يكون الجناح الخلفي

غشائياً (membranous) ويستخدم في الطيران، بينما تقوم الأجنحة الأمامية الصلبة بتغطية الأجنحة الخلفية الرقيقة وتحميها عند التوقّف عن الطيران. وفي الفراشة يختلف شكل الجناح الخلفي وأنماط ألوانه بدرجة ملحوظة عن الجناح الأمامي، كما في الفراشات خطافية الذيل (swallowtail)، أما في البعوض والذباب، فيطلق على الجناح الخلفي اسم الموازن لأنه يعمل كالجيروسكوب (gyroscope) (جهاز تحديد الاتجاه)، وهو بالوني الشكل وأصغر بكثير من الجناح الأمامي ويستطيع استشعار دوران الجسم في أثناء الطيران (الشكل 8,7).

إن تطوّر هذه الأشكال من الأجنحة الخلفية المختلفة منوط بالتغيّر الانتقائي لجغرافيا هذا الجزء من الجسم في أثناء النموّ. ويتحقق التعديل الانتخابي للجناح الخلفي لأن نموّه يحدث تحت إشراف بروتين *Hox* محدد هو الألترابيثوراكس بينما ينمو الجناح الأمامي دون أي إشراف *Hox*. إن الاعتماد الواضح لعملية تشكل الجناح الخلفي على الألترابيثوراكس يتجلى من خلال الطفرات التي تلغي وظيفة هذا الجين في الجناح الخلفي للخنافس والفراشات والذباب، ويؤدي ذلك في جميع الحالات إلى نموّ جناح خلفي مطابق للجناح الأمامي. إن جميع التفاصيل التي تفرق بين الأجنحة الأمامية والخلفية للحشرة يتم التحكّم فيها بطريقة ما من خلال الألترابيثوراكس.

يعدّل بروتين الألترابيثوراكس دارات التحكّم في الأجنحة الخلفية للخنفساء والفراشة والذبابة والحشرات الأخرى بطرق فريدة ومختلفة في كل مجموعة حيوانية، حيث يمارس الألترابيثوراكس إشرافه من خلال الارتباط بالمفاتيح التي تنتمي إلى جينات تنميط الجناح ويتحكم

في نشاطاتها، وهذا يعني أنه خلال رحلة تطوّر الأنواع المختلفة من الحشرات ظهرت متواليات توقيعية للألترابيثوراكس في مفاتيح بعض الجينات. تختلف ائتلافات الجينات في الحشرات المختلفة. فالجينات التي يجب إيقافها لمنع تكوّن العروق في أجنحة الذبابة الخلفية تختلف عن تلك التي يجب تشغيلها لصناعة الذيل الطويل للفراشة خطافية الذيل. فجغرافيا الأجنحة الخلفية تتطوّر من خلال تغيير المفاتيح التي يتحكم فيها الألترابيثوراكس (الشكل 8,7).



الشكل 8,7 **تطوّر جغرافيا الجناح الخلفي.** تطوّرت أشكال مختلفة من أجنحة الحشرات الخلفية من خلال تغيرات في مجموعات الجينات التي يتحكّم فيها بروتين *Hox* الخاص بالأجنحة الخلفية والمعروف بالألترابيثوراكس (رسم ليان أولدز).

لقد تطوّرت الجغرافيا المتخصصة في زوائد المفصليات الأخرى أيضاً بأسلوب مشابه من خلال تغيّر في المفاتيح التي تتحكم فيها أفراد بروتينات *Hox*. فخرطوم امتصاص الرحيق الطويل لدى الفراشات وخرطوم اللدغ لدى البعوض وأرجل القفز القوية لدى الجنادب وصراصير الليل ومخالب جراد البحر والسرطان البحري والسلطعون

جميعها نتاج التطّور الانتخابي لزوائد تتحكم فيها بروتينات *Hox*.

إن تعديل الطرف ذاته ليأخذ عدة أشكال ووظائف مختلفة هو أيضاً القصة التطوّرية الرئيسية لشعبتنا: الفقاريات.

من أصابع السمكة إلى أجنحة الوطواط

بالرغم من أن الفقاريات قد ظهرت بزوائد أقل من المفصليات إلا أنها بالتأكيد لم تكن أقل عبقرية في تشكيل أطرافها وإعادة تشكيلها لتتكيّف مع اليابسة والماء والجو، وفي تطوير أشكال قوية ورشيقة ومتقنة. فعلت ذلك وهي محكومة بتصميم غابر لزوجين من الأطراف لا يحملان غالباً أكثر من خمس أصابع.

يطلق على الفقاريات المزودة بأربعة أطراف اسم رباعيات الأقدام وهو مصطلح علمي يشمل البرمائيات والزواحف والديناصورات والطيور والثدييات. وقد جاءت إلى اليابسة على زوجين من الزعانف الصدرية والحوضية المتطوّرة عن أسماك من العصر الديفوني (Devonian) (قبل حوالي 365 مليون سنة). ولأن هذا الانتقال مثّل واحداً من أكبر الاجتياحات في تاريخ الحيوان ونُفّذ من قبل حيوانات كبيرة نسبياً مصنوعة من هياكل عظمية متينة خلفت أحافير جيدة، فقد صار واحداً من أهم مناطق الدراسة والبحث في علم الأحافير (وهو موضوع الكتاب الصادر حديثاً [على حافة الماء] *At the Water's Edge* لكارل زيمر (Carl Zimmer) والذي أنصح جداً بقراءته).

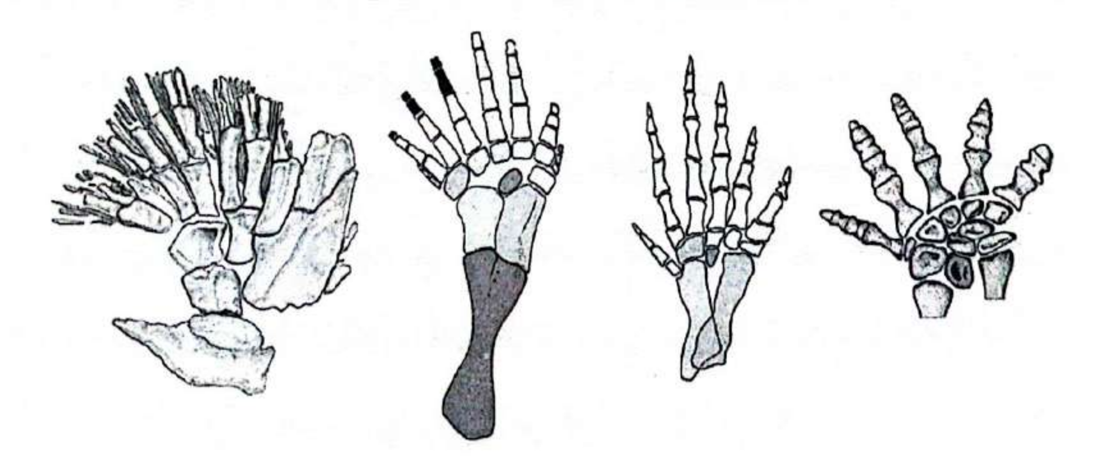
إن الموضوع الذي يستحوذ على اهتمامنا هنا هو كيف تطوّرت الزعانف إلى أطراف، والأطراف إلى بنى كثيرة التفاوت كما نعرفها اليوم

في رباعيات الأقدام؟ يمكن تقسيم الموضوع إلى أربعة أجزاء أو مراحل: أولاً، نريد أن نفهم ما الذي كان لدى الأسماك قبل تطوّر رباعيات الأقدام. ثانياً، نريد أن نعرف ما هي البنى التي ابتُكرت للوصول إلى اليابسة. ثالثاً نريد أن نتعقّب كيف تغيّر تصميم الطرف الأولي لتطوير مختلف أنواع الأطراف كالأجنحة مثلاً. ورابعاً عمدت العديد من الفقاريات وهي تعمل على التكيّف مع أنماط حياة معينة إلى تقليص بعض الأطراف أو إزالتها جميعاً، وسنتفحص مثالين، الأفاعي والأسماك، لمعرفة كيف أَنجز ذلك. في جميع هذه المراحل كان تغير الشكل منوطاً بتطوّر النموّ وسأركز على الكيفية التي تطّورت بها جغرافيا أطراف الفقاريات.

تقع الفترة الحاسمة من السجل الأحفوري لفهم عملية الانتقال من الزعنفة إلى الطرف في العصر الديفوني المتأخر قبل حوالي 362–375 مليون سنة. وقد مرّت الأسماك بمراحل تطوّر قبل ذلك بنحو 150 مليون سنة، والسجل الأحفوري يظهر عدداً جيداً من الأشكال المتفاوتة في أنماط الزعنفة. فبعضها امتلك زعنفة طويلة تمتدّ على طول الجسم، وبعضها الآخر امتلك زعنفة خلفية غير مزدوجة، وأخرى امتلكت مجموعتين من أزواج الزعانف تظهران مباشرة خلف درع الرأس العريض. إن الفرق الأساسي بين الزعانف المزدوجة لهذه الأسماك والأطراف المكتملة لرباعيات الأقدام هو حيازة هذه الأخيرة على أيدٍ وأقدام وأصابع. يوجد تنادد بين العضد/ الفخذ والساعد/ الساق وبين زعانف الأسماك البدائية، لكن الفقاريات الديفونية المتأخّرة امتلكت العنصر الرئيسي الثالث في الطرف والذي يعرف باسم القدم المستقلة (autopod).

ولذلك فإن أصل القدم المستقلة بالغ الأهمية. *السوربترس*

(*Sauripteris*) والأكانثوستيجا (*Acanthostega* الشكل 9,7) من أكثر عينات الأحافير مساعدةً على فهم عملية الانتقال من زعانف بجزأين رئيسيين إلى طرف ذي ثلاثة أجزاء. ولهذين الحيوانين أقدام ذاتية؛ فتشريح الزعنفة الصدرية في السوربترس يحمل تشابهات مذهلة مع الجوانب البدائية في أطراف رباعيات الأقدام، حيث أن لها ثماني عظمات مفصلية شعاعية والتي يبدو أن موقعها وعددها يشترك مع نمط الأصابع في رباعيات الأقدام البدائية. يبدو أنها «أصابع» تطوّرت في بناء الزعنفة، [186] وهناك تشابهات أخرى في موقع وتمفصل عظام الزعنفة الأخرى مع بناء طرف رباعيات الأقدام. إن اكتشاف أسماك بأصابع يوضح أن الأشكال الوسيطة ظهرت فعلاً في السجل الأحفوري، لكننا نحتاج إلى مزيج من المهارة والأناة والحظ الفائق للعثور على الكنز (اكتُشفت أفضل أحفورة لطرف *السوربترس* في منتصف التسعينيات فقط في إحدى حفريات الطرق في بنسلفانيا).



الشكل 9,7 من زعانف السمك إلى الأصابع. شملت بداية تطوّر أيدي رباعيات الأقدام (وأقدامها) كما تظهر في هذه الحفريات الديفونية تقليص عدد الأصابع وتخصيصها. (الرسوم تقدمة نيل شوبين (Neil Shubin) ومايكل كوتس (Michael Coates)، جامعة شيكاغو).

جاءت *الأكانثوستيجا* متأخرة قليلاً عن *السوربترس*، وتمتلك أربع أرجل لكنها ليست قوية كفاية لحمل ثقل الجسم، والعديد من خصائص الطرف والجسم ما زالت سَمَكيَّة الطابع. لقد حملت قدمها الأمامية ثماني أصابع أما الخلفية فسبع. هذا النمط المبكر من أصابع رباعيات الأقدام وثيق الصلة بالأصابع الشعاعية *للسوربترس*، لكن نمط الأصابع الثماني في *الأكانثوستيجا* يحوي أبنية مكرّرة تسلسلياً لخمسة أنواع من الأصابع المتغايرة فقط، وسيتم لاحقاً تقليص عدد الأصابع في رباعيات الأقدام. تمتلك البرمائية البدائية *تولربيتون* (*tulerpeton*) ست أصابع (الشكل 9,7) لكن رباعيات الأقدام المتأخرة ليس بحوزتها سوى خمس، وقد حافظت على هذا الحد الأقصى من الأصابع منذ ذلك الحين أي منذ أكثر من 300 مليون سنة.

يتوجب عليّ الإشارة هنا إنه لا يعتقد بأن *السوربترس* أو *الأكانثوستيجا* هما السلف المباشر لرباعيات الأقدام، إلا أن هذه الأحافير تمثل نمط التغيّرات التي حدثت في سلالات أسماك المياه العذبة في العصر الديفوني المتأخر. ويعتقد أن التشابهات في تشريح الزعنفة والطرف الموجود في رباعيات الأقدام يعكس تطوراً متوازياً في المجموعات المختلفة الواقعة تحت ضغوطات بيئية متشابهة (التطوّر المتوازي ظاهرة متكررة ومهمة لما سأقوله بعد قليل).

بنى جديدة بواسطة مفاتيح جديدة

كيف تطوّرت الأوتوبودات؟ نرجع مرة أخرى للإيفوديفو وتحليل جينات وأجنة المجموعات الحية للتعرّف إلى الكيفية التي أنجزت بها

الإزاحات في جغرافيا الطرف. والمقارنة التي نحتاج إليها هنا هي بين نموّ زعانف الأسماك وأطراف رباعيات الأقدام. تُرتب عناصر الطرف الثلاثة في رباعيات الأقدام من الداني إلى القاصي حيث يأتي العضد أو الفخذ أولاً والأصابع أخيراً. يتشابه نمو المرحلتين الأولى والثانية في الأسماك مع نمو نظيرتيهما في رباعيات الأقدام أما الثالثة فغير موجودة.

يقتضي نمو المراحل الثلاث في أطراف رباعيات الأقدام انتشار مجموعتين محددتين من جينات *Hox*، وهما مجموعتين فرعيتين في عنقودين من عناقيد *Hox* الأربعة. يختلف استخدام جينات *Hox* خلال نموّ المحور الداني-القاصي للطرف عن استخدامها في المفصليات اختلافاً كلياً (حيث يكون دورها في المفصليات عادة تمييز نوع من الأطراف عن الآخر). فالأنماط الفراغية لنشاط *Hox* تتغير بين كل مرحلة وأخرى لتتناسب مع متطلبات كل مرحلة في الطرف. ونعرف من الطفرات في جينات *Hox* التي حدثت في البشر والفئران أن أنماط نشاط *Hox* مهمة لتشكيل طرف طبيعي وتنميطه. وتؤثّر الطفرات في جينات *Hox* المستخدمة في المرحلة الثالثة على عدد الأصابع وحجمها.

إن تطوّر المرحلة الثالثة من نشاط *Hox* في القدم الذاتية ابتكارٌ قدمته رباعيات الأقدام. فهذه المرحلة تتحكم بها مفاتيح مختلفة عن تلك التي تتحكّم في المرحلتين الأولى والثانية. ويبدو أن هذة البنية الجديدة قد تطوّرت لأن مجموعة من جينات *Hox* الفقاريات قد اكتسبت مفاتيح جديدة أو مجموعة من المفاتيح التي تفعّلها في جزء قاصٍ جديد في طرف الجنين.

هذه ليست التغيّرات الوحيدة التي شاركت في تطوّر القدم الذاتية. فهناك العديد من التغيّرات النمائية والجينات التي شاركت في صياغته. لقد حصلت جينات أخرى مثل أعضاء عائلة إنشاء العظام (*BMP*) وعائلة صناعة المفاصل (*GDF*) على مفاتيح خاصة بالأصابع، كما أن الجينات المتحكّمة في تشكيل وتنميط جميع الأنسجة الرقيقة مثل الأوتار والأربطة والعضلات قد تطوّرت أيضًا.

الطيران والانزلاق:

تطوير أطراف من أجل نمط حياة جديد

تغيّر معمار أطراف رباعيات الأقدام ووظيفته خلال الثلاثمائة والخمسين مليون سنة اللاحقة عدة مرات وفي اتجاهات مختلفة، من التعديلات المذهلة على شكل الأصابع خلال تطوّر الأطراف إلى أجنحةٍ عدة مرات، إلى الدرجات المتفاوتة من تقليص الأطراف في حيوانات اليابسة والماء. وتطلبت جميع هذه التعديلات تطوّر نموّ الطرف، وقد تمكن باحثو الإيفوديفو في حالات عدة من تحديد بعض الإزاحات المهمة في جغرافيا الطرف النامي.

أُعيدت قولبة الطرف الأمامي في رباعيات الأقدام ثلاث مرات مختلفة ليصبح جناحاً معداً للطيران في كلٍ من التيروصورات والطيور والخفافيش. وحتى يعمل الطرف الأمامي بمثابة جناح، يتوجب عليه أن يتحرك إلى الأعلى والأسفل وإلى الأمام والخلف وأن يُطوى على الجسم في حالة التوقّف والاستراحة. من المثير للاهتمام أن هذه التصاميم الفقارية الثلاثة تختلف بعضها عن بعض في تفاصيل رئيسية، فقد وصفت

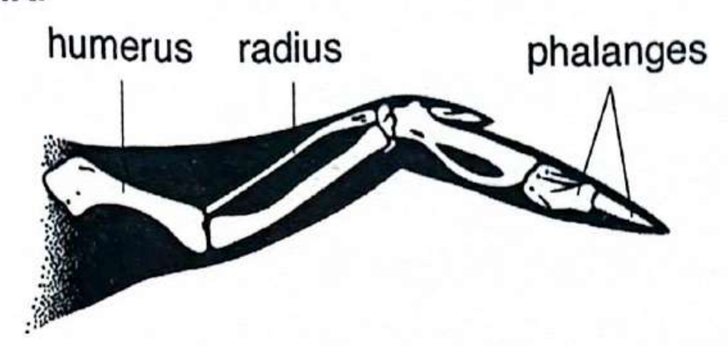
بات شيبمان (Pat Shipman) في كتابها [جناح أخاذ] *Taking Wing* أجنحة التيروصورات بأنها «أجنحة أصبع»، وأجنحة الطيور بأنها «أجنحة ذراع»، أما أجنحة الخفاش فهي «أجنحة يد» (الشكل 10,7). دعنا نتأمل هذه التصاميم الثلاثة في ترتيب تطوّري، لنبدأ بالتيروصورات.

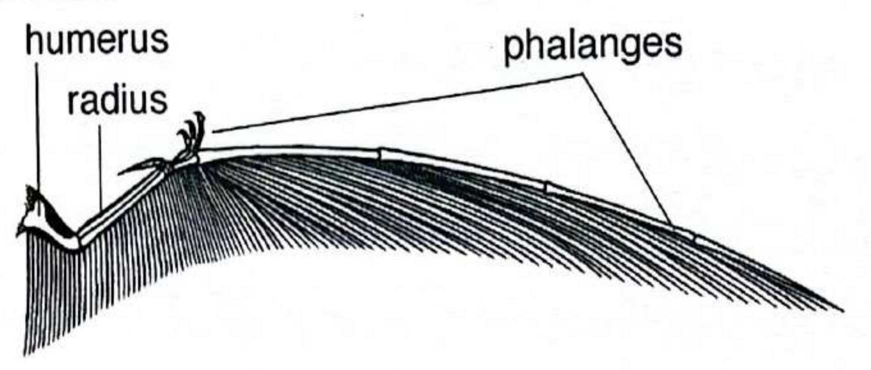
بدأت التيروصورات بالطيران قبل حوالى 225 مليون سنة، قبل تطوّر الطيور بنحو 70 مليون سنة (تطوّرت الطيور من ديناصورات ذات ريش وليس تيروصورات). إن الخاصية الأبرز في جناح التيروصور هي إصبعه الرابعة الطويلة جداً والتي دعمت الجزء الخارجي من الجناح. واحتفظ الجناح بجميع أجزاء الطرف والأصابع الأولى والثانية والثالثة بينما انصهرت عظام اليد في بعضها بعضاً، ولم تكن الأصابع الثلاث الأولى مرتبطة بغشاء الجناح. وامتد هذا الغشاء على طول الجناح بأكمله لكن أغلب امتداد الجناح كان مدعوماً بالإصبع الرابعة المستطيلة.

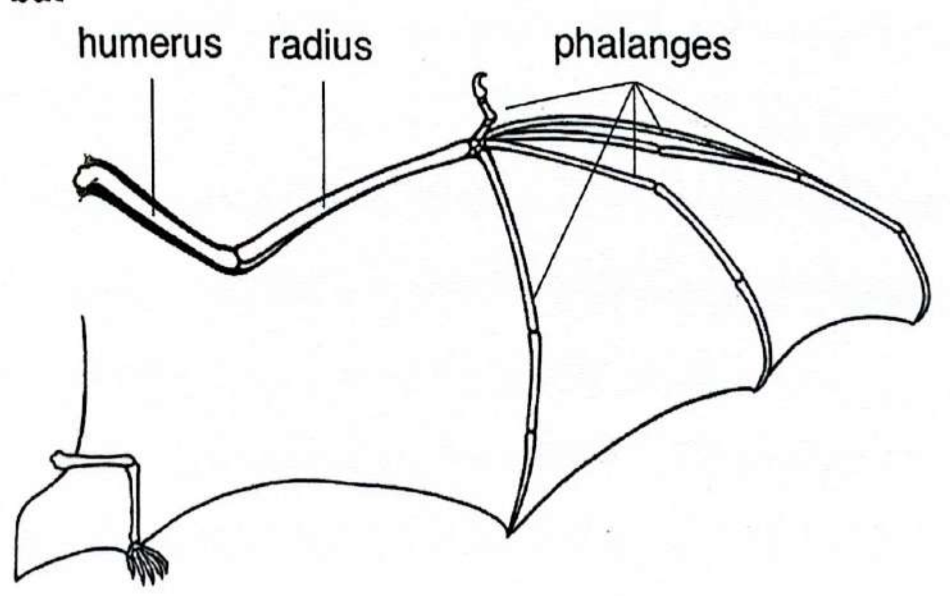
لا تمتلك الطيور جناحاً غشائياً فأجنحتها مكوّنة من ريش ينمو على الجلد الذي يغطي الطرف الأمامي بأكمله. أما امتداد الجناح فهو أطول في منطقة الساعد وأقصر عند عظام العضد واليد والأصابع. إن الأصابع الأربع في الطيور قصيرة جداً بالفعل.

أما الخفاش فجناحه يتكون من غشاء تدعمه الذراع وأصابع مستطيلة جداً هي الأصابع الثانية إلى الخامسة صانعة ما يسمى «بالجناح اليد». إن الحافة الزائدة في الجناح هي غشاء مشدود بين الأطراف الخلفية ويلتصق بالكعب موفراً الثبات خلال الطيران.

يعكس الاختلاف المعماري في هذه الأجنحة تعديلات نهائية مختلفة لتصميم طرف أمامي مشترك بين رباعيات الأقدام. ورغم أننا نعرف







الشكل 10,7 **تطوّر الجناح في الفقاريات.** أجنحة الطيور هي «أجنحة ذراع» حيث ينمو الريش على طول الطرف بأكمله، أما أجنحة التيروصورات فهي «أجنحة أصابع» حيث إن أغلب غشاء الجناح معلّق بإصبع استطالت كثيراً، أما جناح الخفاش فهو «جناح يد» حيث إن سطح الجناح معلق بعدة أصابع في الطرف الأمامي ويمتد إلى الطرف الخلفي (رسم ليان أولدز).

القدر الكبير من التشابهات التي تقبع خلف تكوين الطرف الأمامي عند الثدييات والطيور إلا أن الفروقات الدقيقة المسؤولة عن الخصائص التي تمايز بين أجنحة الطيور والخفافيش ليست معروفة بالتفصيل حتى الآن، وتخضع هذه الأعضاء حالياً لدراسة مكثفة من قبل باحثي الإيفوديفو.

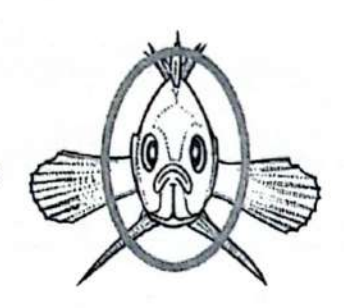
بعض الإزاحات النهائية مفهومة أكثر في تعديلات الطرف التي حصلت في الأفاعي وبعض أنواع الأسماك. لقد استطالت أجسام الأفاعي كثيراً وكُظم نموّ الأطراف، ولا تزال بقايا أثرية للطرف الخلفي في البايثون (python) والأصلة (boas) تتشكل حتى الآن، أما الطرف الأمامي فقد اختفى تماماً. ومن حيث المبدأ يمكن كظم تشكّل الطرف في عدة نقاط، بداية بما يسبق التشكل الأولي لبرعم الطرف إلى المراحل الأخيرة من بناء تفاصيله.

كشفت اختبارات نمو الطرف في أجنّة البايثون عن تغيّرات تطوّرية في بداية تشكل برعم الطرف تعمل على إلغاء نموّه، إذ عمل توسّع مناطق جينات *Hox* معينة على طول جذع البايثون وصولاً إلى الرأس على إقصاء موقع إنشاء برعم الطرف الأمامي. أمّا في برعم الطرف الخلفي فرغم أن البرعم يتكوّن إلا أن نموّه يتعرّض للإيقاف. وترتبط عرقلة تشكّل الطرف الخلفي بغياب نشاط بروتينات تأشيرية مهمة، بما في ذلك بروتين القنفذ الصوتي، من معضّي برعم الطرف الخلفي. ومازالت أفاعي البايثون والأصلات تنمّي نتوءاً صغيراً للطرف الخلفي قريباً من المذرق (cloaca)، إلا أن العائلات الحديثة من الأفاعي لا تفعل. ومن المحتمل أن الانعدام التام للطرف في هذه الأفاعي يعود إلى فشل تشكل الطرف الخلفي في مرحلة أسبق.

إن تطوّر الطرف في أصول الأنواع الرئيسية في الفقاريات ليس نتاجاً لهذه التغيّرات الغابرة فقط. فلا يزال تطوّر الأطراف وتكيفها مستمر، كما أن خصائصَ مثل عدد الأصابع متغيرٌ جداً في الأنواع المتطوّرة حديثاً (مثل السمندرات والعضايات (lizards)). وفي الأسماك أيضاً تُظهر الزعانف تطوراً ديناميكياً. فمجموعة أبي شوكة ثلاثي الأشواك (three spine stickleback) تمتلك تاريخاً حديثاً جديراً بالملاحظة صنع منها نموذجاً بارزاً لتطور هياكل الفقاريات. ظهر زوجان من أشكال أبي شوكة في العديد من بحيرات المناطق الشمالية في شمال أمريكا متطوّرة حديثاً من سلف بحري مشترك. ومع بدء انحسار الأنهار الجليدية مع نهاية العصر الجليدي قبل 15,000 سنة، احتُجزت تجمّعات من أبي شوكة في بحيرات جليدية، ثم وفي فترة جيولوجية قصيرة تطوّرت هذه التجمّعات إلى شكلين يشغلان أنماط حياة مختلفة: شكل الماء الضحل ساكن القيعان قصير الأشواك وشكل المياه المفتوحة طويل الأشواك (الشكل 7,11).

يختلف هذان الشكلان تحديداً في تصفيح الجسم، الذي يتضمن صفائح قاسية على جوانب الجسم وأشواكاً خارجة من أعلاه وأسفله. يعتمد عدد الأشواك وطولها على الضغط الافتراسي (predation pressure)، ففي المياه المفتوحة تساعد الأشواك الطويلة أبا شوكة على حمايته من أفواه المفترسين، لكن أشواك الحوض الطويلة تشكل عائقاً في القاع. وإن بدا الأمر غريباً، إلاّ أن يرقات اليعاسيب المفترسة بنهم تستطيع الإمساك بأبي شوكة من أشواكه. وتحت هذا الضغط الشديد، تطوّرت الأشكال ذات الأشواك الضعيفة مراراً في تجمّعات طبيعية.









الشكل 11,7 **تطوّر عدد الأشواك في أسماك أبي شوكة.** تحمي الأشواك الطويلة أشكال المياه المفتوحة من أفواه المفترسين بجعل قطر السمكة أكبر، لكن الأشواك الطويلة تشكل عائقاً لأشكال ساكنات القيعان التي تتغذى عليها يرقات اليعاسيب، ولذلك فإن تقليص الأشواك يساعد في تقليل عملية الافتراس (الأشكال تقدمة ديفيد كنجسلي (David Kingsley)، معهد هوارد هيوز الطبي وجامعة ستانفورد)

إن أشواك الحوض جزء من طرف السمكة الخلفي، ولذلك فإن تقليصها هو تعديل على هيكل الطرف الخلفي. لقد عرف علماء أحياء النموّ الكثير حول عدد من الجينات التي تدخل في تشكيل وتمايز الأطراف الأمامية والخلفية، ويعرف أحد هذه الجينات باسم بيتكس*1* (*Pitx1*) الذي يدخل في صناعة الأطراف الخلفية في رباعيات الأقدام والزعانف الحوضية في الأسماك. وقد كشف تحليل نشاط *Pitx1* في شكل أبي شوكة ضعيف الأشواك في بحيرة بكولومبيا البريطانية أن هذا النشاط تحديداً مفقود في برعم الزعنفة الحوضية لهذه الأسماك. ويبدو أن هذا التغيّر التطوّري في التحكم بجين *Pitx1*، لعلك خمنت ذلك، حدث بسبب تغيّر في مفتاح من مفاتيح جين *Pitx1* أدى إلى إلغاء نشاطه في

الطرف الخلفي. لقد سمح التغيّر التطوّري في هذا المفتاح لوظيفة *Pitx1* بالتغيّر في الزعنفة الحوضية دون التأثير على وظائف الجين الأساسية في أمكنة أخرى من السمكة النامية.

علاوة على ذلك فإن تحليلاً لتجمع آخر من أبي شوكة المقلص الأشواك في أيسلند كشف أن التغيّر ذاته في نشاط *Pitx1* قد حدث مستقلاً عن تجمع كولومبيا البريطانية، كما أن تقليص الأشواك واضح في أحافير هذا النوع وأنواع أخرى من أجناس الأسماك البعيدة القرابة أيضاً. هذا يعني أن تقلّص الأشواك الحوضية متكرّر الحدوث وبصفة مستقلة في تطوّر بعض الأسماك، وربما تضمن مراراً تغيّرات تطوّرية في مفاتيح جين *Pitx1*. تظهر هذه المشاهدات والأمثلة عن تطوّر الأقدام الفكّية التي وصفتها في الفصل السابق أن بعض التغيّرات التطوّرية ليست نادرة أو وحيدة الحدوث، فتحت الضغوط الانتخابية المتشابهة تحدث تغيّرات متشابهة في التجمعات والأنواع المختلفة. التطور بهذا المعنى «قابل لإعادة الإنتاج» (reproducible).

إن تقليص الطرف أو الزعنفة ليس أمراً نادراً بكل تأكيد. لقد عملت مجموعتان منفصلتان من الثدييات، الحوتيات (cetaceans) (الحيتان والدلافين) وخراف البحر، على تقليص أطرافهما الخلفية التي تطوّرت باستقلالية بعضها عن بعض من أسلاف تسكن اليابسة إلى نمط حياتهما المائي. بالإضافة إلى ذلك فإن أطراف السحالي عديمة الأرجل قد تقلصت مراراً هي الأخرى. إن أسماك أبي شوكة من ثمَّ ليست شذوذاً غامضاً بل هي نموذج مهم على انتقالات تطورية عظيمة وشائعة. لقد حُفظ سجلها الأحفوري الحديث، الذي لا يتعدى بضعة آلاف سنة،

جيداً في بعض المواقع، ودلل هذا السجل على أن التقليص الحوضي يمكن أن يتطوّر في أقل من 10,000 جيل أو في 10,000 سنة، ورغم أن هذه المدة ليست لحظية بمقاييسنا الزمنية إلا أنها تعتبر زمناً جيولوجيا قصيراً جداً. إن سجلها الأحفوري الممتاز والتفاصيل الجينية لتجمعاتها الحية والأمثلة المتكرّرة والمستقلة على التغيّرات التطوّرية المتشابهة تجعل أبا شوكة أحد أكثر أمثلة التطور إقناعاً.

الأسرار الأربعة للابتكار التطوّري

تكشف الحيوانات والبنى المذكورة في هذا الفصل عدداً من أهم أسرار تطوّر الأشكال الجديدة. سأعيد هنا وأتوسع حول أربعة منها: السر الأول من أسرار الابتكار التطوّري هو، بلا شك، أن تعمل بما هو موجود؛ ربما من الأفضل أن نتأمل ما الذي لم يحدث في هذه الحيوانات، فلا مغازل العناكب اختُرعت من الصفر ولا أجنحة الفقاريات نبتت سريعاً من أعلى جسم حيوان بأربع أرجل أو من جوانبه، بل إنها وجميع البنى الأخرى محض تعديلات على أطراف وجدت مسبقاً. سجل فرانسوا جاكوب قبل أكثر من خمس وعشرين سنة هذا الأمر الجوهري في التطوّر في مقال بعنوان «التطوّر والترقيع» («Evolution and Tinkering»). لقد أشار إلى أن الطبيعة تعمل غالباً كالسمكري عبر معالجة وترقيع المواد المتوفرة وتعديلها وتنقيحها باستمرار عبر الأزمنة، وليس كالمهندس الذي يأتي بخطة مسبقة وأدوات متخصصة. تمتد هذه الصورة لتشمل المستوى الجيني، حيث نجد أن الجينات «القديمة» ذاتها تستخدم بطرق مختلفة. إن الطريق الأكثر شيوعاً في الابتكار التطوّري

هو الخط المتعرج بين النقطتين «أ» و«ب» وليس إلى «ب» مباشرة من الصفر.

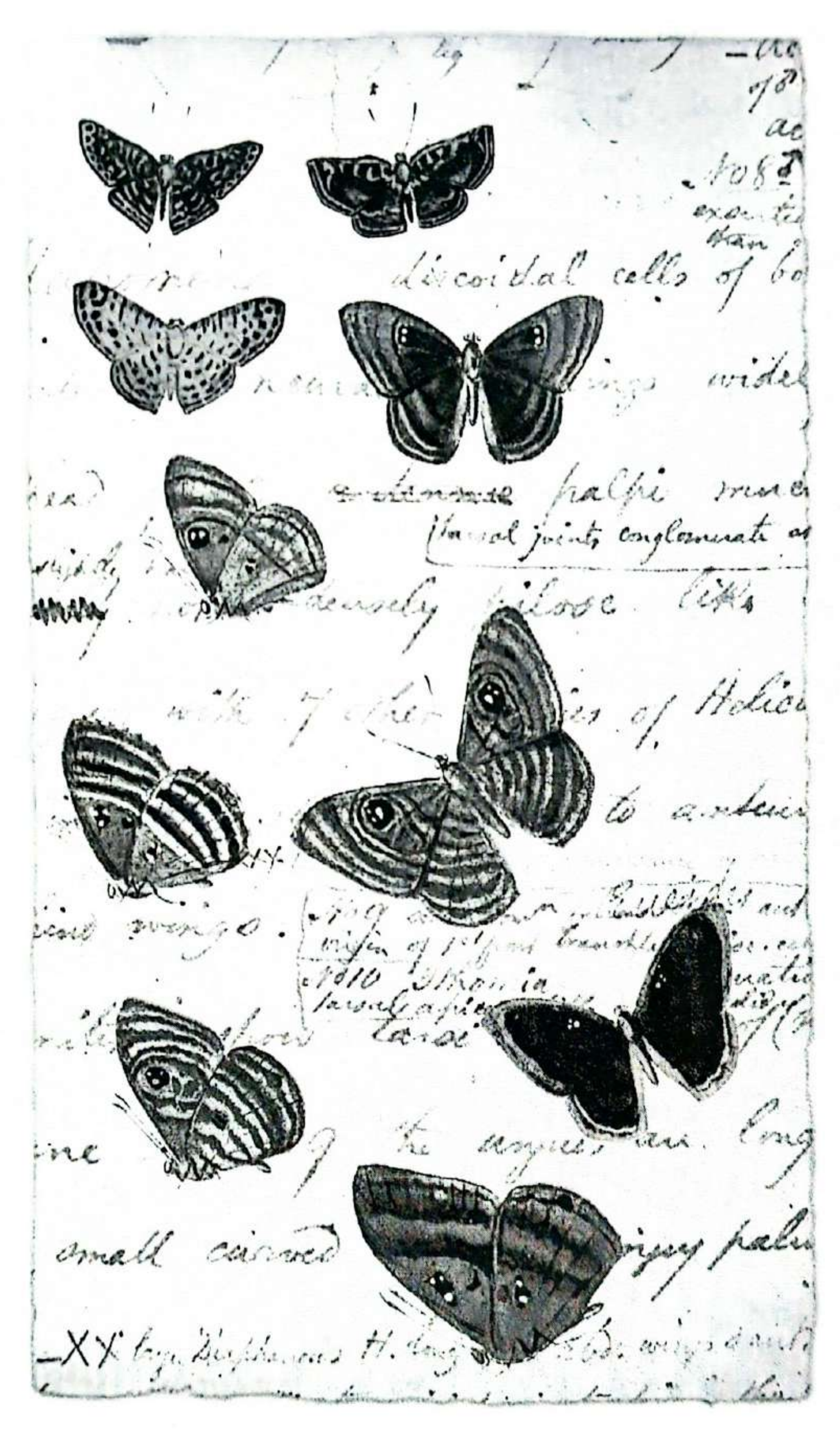
السران الثاني والثالث، هما التعدد الوظيفي والحشو، وكان دارون أول من التفت إليهما. لقد أكدتُ على الفرص الممنوحة عند حضور هذين البُعدين، فأي جزء من بناء يتسم بالتعدّدية الوظيفية والحشو يفتح باباً للتخصصية من خلال تقسيم العمل على بنيتين.

السر الرابع للابتكار هو المدولية. لقد ذكرت في الفصل الأول بأنني أعتقد أن المعمار المدولي في المفصليات والفقاريات كان مسؤولاً جزئياً عن نجاحهما العظيم. انظر إلى ما حقّقته مدولية المفصليات؛ تلك التكيّفات المختلفة التي تطوّرت متوازية في الحيوان ذاته، والابتكارات التي ضمنت قيام أكثر المجموعات الحيوانية تنوّعاً على ظهر الأرض. أما في الفقاريات فإن القدرة على تطوير الإصبع الرابعة الطويلة في التيروصورات أو عدة أصابع طويلة في الخفافيش امتد عليها غشاء الجناح، أو تطوّر مئات الفقرات في الأفاعي لمنح الجسم استطالته، أو التقليص الانتقائي للبنى الحوضية/ الطرف الخلفي في أبي شوكة ترجع للتصميم المدولي للجسم الحيواني. تسمح المدولية بتعديل أجزاء الجسم وتخصّصها -إلى أبعد الحدود أحياناً- مستقلّة عن الأجزاء الأخرى.

تحت هذا التشريح المدولي للحيوانات البالغة تقبع جغرافيا الجنين المدولية والمنطق الجيني المدولي للمفاتيح. لقد سمحت المفاتيح للتغيّر التطوّري بالحدوث في جزء واحد من البنية مستقلاً عن الأجزاء الأخرى. إن المفاتيح هي سرّ المدولية والمدولية هي سرّ نجاح المفصليات والفقاريات.

يُفترض بنتائج التنوّع الأحيائي أن تكون بديهية الآن؛ الابتكار يسمح باجتياح أنماط حياة جديدة والاجتياح يقود إلى توسع في التنوّع الأحيائي.

إلى هنا أكون قد غطيت تقريباً كل الإزاحات الكبيرة في تصميم الجسم والطرف، أو الفروقات التي تمايز بين المجموعات الأعلى في المفصليات والفقاريات. لا توجد مشكلة في الحديث عن «الطيور» و«الخفافيش» و«الخنافس» بالمعنى العام، لكن يجب ألا ننسى أن هذه الأسماء تمثل في الحقيقة تصنيفات واسعة تحوي العديد من الأنواع -مئات من الخفافيش وآلاف من الطيور، ومئات الآلاف من الخنافس. يعود نجاح كل مجموعة جزئياً إلى الابتكارات الرئيسية التي ذكرتها، لكن وفرة كل صنف من الحيوانات ناتج أيضاً عن التوسّع إلى عدة أنماط جديدة للحياة، وإلى ابتكارات جديدة عادة (السونار في الخفافيش، والأوتار بين الأصابع في أقدام الطيور المائية، والأغاني الطويلة للتواصل). سأركز في الفصل التالي على مجموعة واحدة هي الفراشات من أجل توضيح الكيفية التي يوفر فيها ابتكار واحد، الجناح، الأساس لجولات لاحقة من الابتكار والتنوّع التوسّعي.



رسومات وملاحظات من دفتر المستكشف الطبيعي هنري والتر بيتس (رتبها جوش كليس).

الفصل 8

كيف
حصلت
الفراشة
على بقعها؟

«التطور فرصة التقطت على جناح السرعة»[1]

ستيوارت كاوفمان (Stuart Kauffman)
At Home in the Universe **[ببيتي في الكون]**
معيداً صياغة عبارة جاك مونو في كتابه **[الفرصة والضرورة] Chance and Necessity**

غادر هنري والتر بيتس الأدغال إلى إنجلترا في يونيو 1859، بعد أن قضى إحدى عشرة سنة في الأمازون جمع فيها 14,712 نوعاً حيوانياً مختلفاً منها 8000 نوع جديد كلياً على العلم، غادر بعد ذبول جسده

(1) العبارة في أصلها الإنجليزي تعني «التطور فرصة التقطت على الطاير» غير أن المؤلف يريد أن يقدم معنىً مزدوجاً لكلمة جناح بحيث تعني على الطاير وجناح الفراشة في آن واحد. ينظر ملحق المراجع والقراءات الإضافية للاستزادة. المترجم

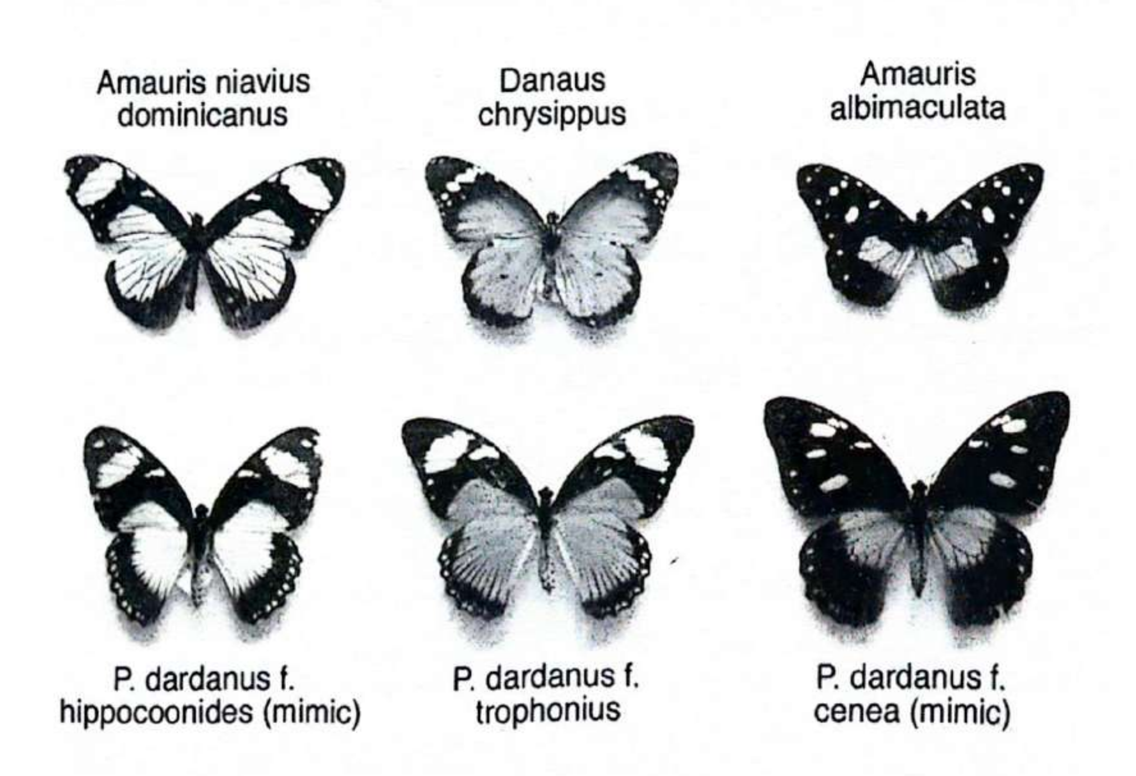
بفعل الأمراض الاستوائية والتغذية السيئة والتعرّض الطويل للشمس والحرارة، وبسبب تعرضه للسرقة وهجرانه من قبل خدمه ومعضلات أخرى. كان توقيته موفقاً فبعد شهور قليلة سيظهر كتاب داروين **أصل الأنواع**.

سيغدو الرحالان صديقين حميمين بسرعة. فقد ناصر بيتس آراء داروين على الفور، وبدأت بينهما مراسلات استمرت أكثر من عشرين سنة حتى وفاة داروين. كان بيتس متحمساً ومقتنعاً بأن ملاحظاته وما جمعه سيدعم نظريات داروين. ففي إحدى رسائله الأولى لداروين كتب بيتس: «أعتقد أنني اختلستُ نظرةً إلى المختبر الذي تصنع فيه الطبيعة أنواعها الجديدة».

كان أعظم إسهامات بيتس الاكتشاف الذي أسماه «التشابه التناظري» (analogical resemblance) أو المحاكاة (mimicry). درس بيتس حالات عديدة في الحشرات، وخصوصاً الفراش، حيث يلوِّنُ نوع ما جسمه بلون نوع آخر لغرض الحماية. لاحظ بيتس أن الطيور تجد بعض الفراشات مستساغةً للأكل بينما بعضها الآخر غير مستساغ، وتعلمت الطيور التفريق بين أنواع الفراش بناء على تجارب قليلة. ولاحظ بيتس أن بعض الفراش السائغ للطيور يموّه نفسه عبر اتخاذه أنماط لون الفراشات غير سائغة المذاق التي تعلمت الطيور تجنّبها، مما وفر لها الحماية من الافتراس. لقد أثار هذا العرض للانتخاب الطبيعي في الفراش داروينَ الذي أخبر بيتس أن ورقته العلمية الواصفة للمحاكاة «إحدى أكثر الأوراق العلمية التي قرأتها في حياتي روعة وبروزاً». وتعرف هذه الظاهرة حتى اليوم بمحاكاة بيتس (Batesian mimicry)

(الشكل 8 ,1).

داوم داروين على الاستعانة ببيتس، نظراً إلى معرفته الواسعة والأصيلة بالتاريخ الطبيعي، لاعتصار رؤى لعمله المستمر (حينها والذي غدا مشهوراً) حول الفروقات الجنسية والانتخاب. وتلقى بيتس تشجيعاً كبيراً من داروين خصوصاً ليكتب وينشر سرداً عن رحلاته. لم يكتف بيتس بالاستفادة من آراء داروين فقط، بل إن داروين راجع وحرّر وكتب «مقدمةً» للكتاب الوحيد الذي كتبه بيتس خلال كامل مسيرته المهنية وهو [**عالِم طبيعة على نهر الأمازون**] *Naturalist on the River Amazons* (1863). وتوقّع داروين أن يلاقي الكتاب نجاحاً كبيراً وكان محقاً، فقد



الشكل 1,8 **محاكاة بيتس**. جميع الفراشات في الصف العلوي بغيضة المذاق للطيور. كل تفاوت في فراشة *بابيليو داردانوس* (*Papilio dardanus*)خطافية الذيل في الصف السفلي تمويه يحاكي الشكل الأعلى منه. لاحظ التشابه الواسع بين كل زوج من الأنواع المختلفة كلياً. (الصور تقدمة د. بول بريكفيلد (Paul Brakefield)، جامعة لايدن).

برهنت كتابة بيتس على رفعتها مقارنة بكتابة داروين أو زميله في رحلة الأمازون ألفرد رسل والاس. وما زالت قراءة كتاب بيتس مبهرة إلى اليوم.

تضمنت العينات التي زادت على 14,000 نوع عدداً من الفراش، منها 550 نوعاً من منطقة إيجا فقط. وقد أدرك بيتس قيمة الكنوز التي أحضرها عبر عدسة داروينية قائلاً: «لا يمكن للوصف أن ينقل فكرة وافية عن الجمال والتنوّع في شكل ولون هذا الصنف من الحشرات في ضواحي إيجا. لقد أوليتُها عناية فائقة، بعدما اكتشفت أن هذه القبيلة كانت أفضل تكيّفاً من سواها من الحيوانات أو النباتات، لأقدم حقائق توضح التعديلات التي تخضع لها كل الأنواع في الطبيعة تبعاً للظروف المحلية المتغيرة».

واستمر بيتس كاتباً مقطعي المفضل: «وعليه يمكن القول إن الطبيعة تكتب على هذه الأغشية المنبسطة، كما نكتب على لوح، قصة تعديلات الأنواع، وهكذا فالحقُّ أن جميع تغيّرات التعضّي مُسجَّلة هناك».

ويختتمُ قائلاً: «علاوة على ذلك، فأنماط ألوان هذه الأجنحة تُظهِر على وجه العموم، وبانتظام كبير، درجة قرابة الدم بين الأنواع. وبما أن قوانين الطبيعة يجب أن تكون واحدة تسري على جميع الكائنات، فإن الخلاصات التي تقدمها هذه المجموعة من الحشرات يجب أن تنطبق على جميع العالم العضوي. وعليه فإن دراسة الفراشات -الكائنات المثيرة للابتهاج واللهو-بدلاً من أن تكون محل استخفاف، ستُثمّن في أحد الأيام كأحد أهم فروع العلم الأحيائي».

لقد شارك العديدُ من علماء الطبيعة والمختصون والهواة بيتس شغفه بالفراش وقناعته بقيمتها الثمينة للعلم منذ أن كتب تلك الكلمات قبل 140 سنة. فتلك القصص المكتوبة على الأغشية المنبسطة لأجنحة الفراش لم تبهج دارون فقط، بل دفعت كذلك وليام بيتسون للتركيز على أفراد حيوانات تتحلّى بأنماط شاذة في كتابه البارز.[1] ومنذ تلك الأيام شخّص علماء الطبيعة ووصفوا أنماطاً أخرى من ظاهرة المحاكاة في الفراش (كعيون البومة، أو الأوراق الميتة، أو حتى ذرق الطيور)، وكانت هذه المجموعة الحيوانية مصدر إلهام للعديد من الدراسات التطورية والبيئية. وقد امتدّ الولع بالفراش وتجاوز العلماء التقليديين بطبيعة الحال، فقد عُرِف عن الروائي فلادمير نابكوف الولع الذي لازمه طيلة حياته بالفراش. وأعانته خبرته في ذلك باعتباره القيِّم على مجموعة ليبيدوبترا (Lepidoptera) للفراش والعث في متحف هارفرد لعلم الحيوان المقارن قبل أن يذيع صيته الروائي.

سأستكشف في هذا الفصل العالمَ الرائع لأنماط أجنحة الفراشات. ففي هذه المجموعة من الحشرات كان الجناح بمثابة لوحة بيضاء تطوّرت عليها آلاف الأنماط من الألوان. سأركز على اختراع أنظمة تنميط الألوان، وكيف تطوّر كل هذا التفاوت فيها. سنرى أن الفراش يوفر المثال المبهر على أن تطوّر الأنماط الجديدة يتم عندما تتعلم الجينات الغابرة حيلاً جديدة.

(1) المقصود كتاب بيتسون [مواد لدراسة التفاوت] Material for the Study of Variation .

فهم أنماط الأجنحة

لم أضطر للسفر إلى نصف العالم الآخر أو التعرّض للصعاب التي خاضها بيتس من أجل دراسة الفراش. فقد ابتدأتْ رحلتي في موقف سيارات في حرم جامعة ديوك في دُرْهام بكارولينا الشمالية. زرتُ الجامعة قبل سنوات لألقي محاضرة عن أبحاثي التي تركّزت حينها على كيفية تحكم الجينات بعدد ومواضع الهُلب على جسم ذبابة الفاكهة. وكان مخططاً أن ألتقي بعدد من أساتذة كلية علم الأحياء بالجامعة، وذلك تقليد متبع عندما يأتي محاضرٌ من جامعة أخرى، لكن أحد الأساتذة المفترض لقاؤهم أتى متأخراً لأن أنبوباً انفجر في بيته. كنت على وشك فقدان فرصة لقاء فِرد نيهوت في ذلك اليوم، ولو حدث ذلك لما ظهر هذا الفصل، ولفاتتني إحدى أكثر اللحظات تشويقاً وإثارة في المختبر.

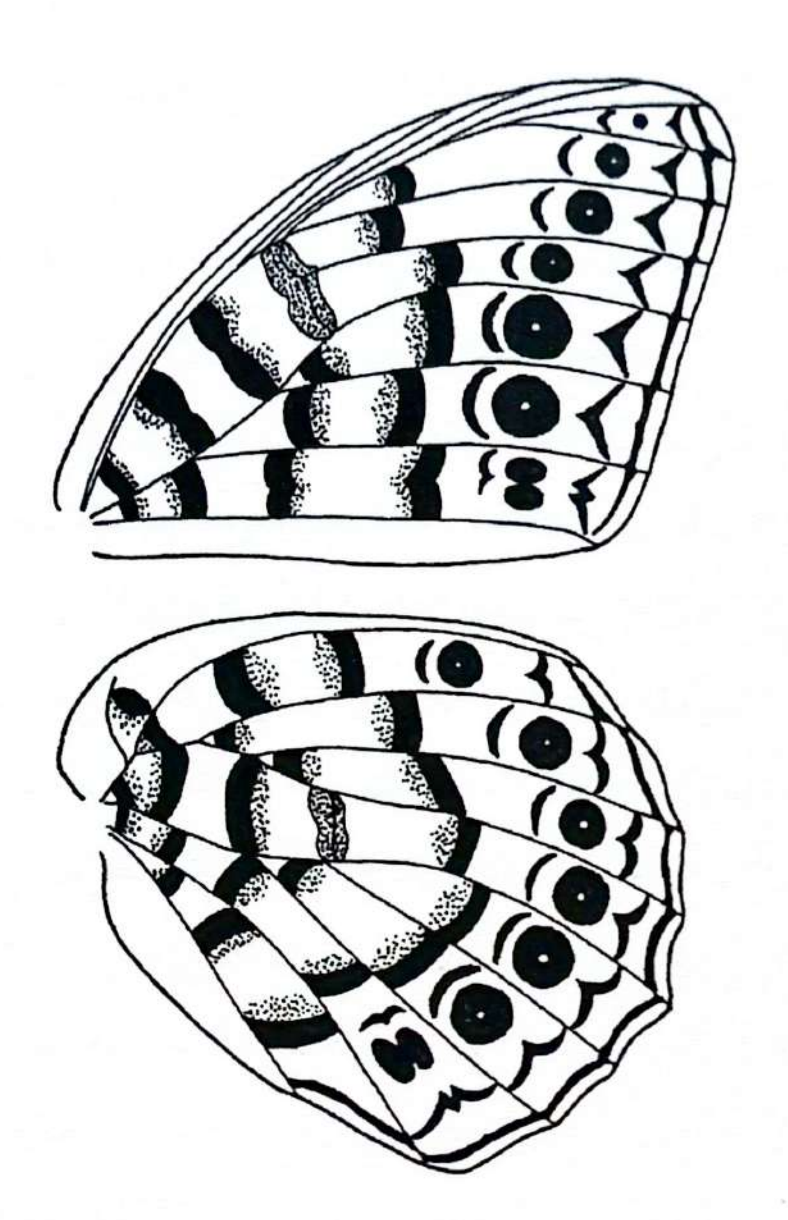
كانت أنماط هُلب الذباب نموذجاً ممتازاً لفهم الأسرار العامة للنموّ مثل كيف توضع البنى في مواقع محدّدة بدقة على الجسم. ولكن خلال الدقائق التي مشيناها معاً في مواقف السيارات لمقابلتي التالية، سألني فِرد إن كان باستطاعة القوانين التي اكتشفناها حول هُلب الذبابة شرحَ شغفه العميق: الأنماط على أجنحة الفراشة. وبصراحة لم تكن لدي أية فكرة.

بحكم تعوّدي على الأجنحة الباهتة لذبابة الفاكهة، كنت كلما ألقيتُ نظرةً على أجنحة الفراشة رأيتُ فوضى: أنماطاً صارخة وألواناً موجودة في كل الاتجاهات، وخطوطاً، وبقعاً، وخربشاتٍ، ولُطخاً لم أستطع أن أضعها في نظام ما (لدي التصوّر ذاته عن الفن الحديث).

لكن سؤال فرد شغلني شهوراً عديدة. لقد كنت على علم بالمعرفة المتراكمة حول محاكاة الفراش، وتجنّبها المفترسين، والانتخاب الجنسي (sexual selection). كان هذا منجم ذهب لو تمكّن أحدهم من فهم هذه الأنماط وفهم الآليات الجينية والنمائية التي تصنعها.

لحسن الحظ فإن فرد سرعان ما نشر كتاباً لا غنى عنه حول جميع القضايا المتعلقة بعلم أحياء الفراشة. تعلمتُ أن الفوضى التي تسمُ أنماط أجنحة الفراشة يمكن تحليلها لتُظهر بعض النظام. ففي عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين، اقترح بعض علماء الأحياء المقارنة مخططاً شاملاً لأنماط جناح الفراشة، ومثّل هذا «المخطط الأساسي» الصورة المثالية التي تفرّعت عنها أنواع الفراش بدرجات مختلفة. احتوى المخطط الأساسي على عدد من عناصر الأنماط، قرب قاعدة الجناح ومركزه وقرب حافته، التي تتكرّر في كل وُحيْدَة (subdivision) محاطة بالعروق. وتتكوّن عناصر الأنماط هذه من مجموعة أشرطة مختلفة العرض وعُيينات (الشكل 8,2). إن وحيدات الجناح مثال على التنادد التسلسلي، وعليه فإن الأنماط الموجودة في هذه الوحيدات مدولية التصميم.

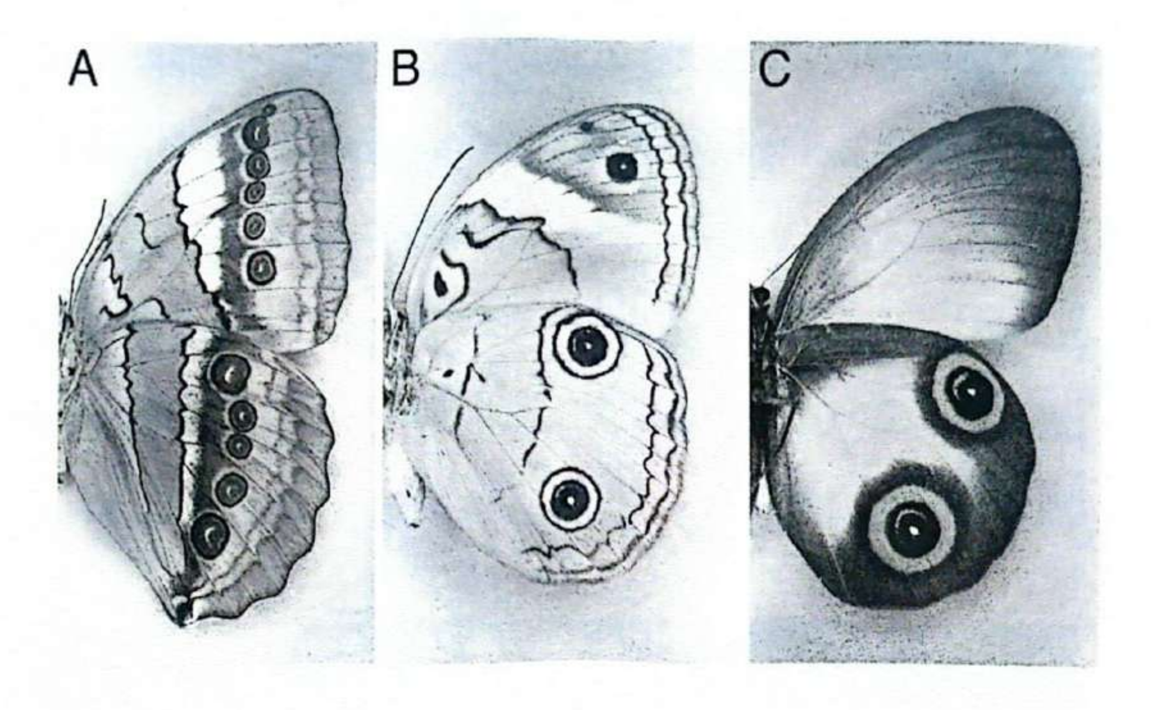
تتكون أنماط جناح الفراشة عموماً من مجموعات جزئية من نمط المخطط الأساسي الكامل. على سبيل المثال تُظهر *ستيكوفثالما كامادينا* أغلب عناصر المخطط الأساسي بينما تُبرز فراشات أخرى عناصرَ قليلة من هذا المخطط الأساسي (الشكل 8,3). ويظهر مسح آلاف من أنماط أجنحة الفراش الحي أن التنوّع ناجم بصورة كبيرة عن فَقْد عناصر معينة، أو تعديل وإعادة موضعة هذه العناصر. فالأنماط التي تبدو



الشكل 2,8 **المخطط الأساسي لعناصر الأنماط الممكنة**. يصوّر هذا المخطط طيف العناصر الممكنة مثالياً في فراشات الحوريات Nymphalid. لاحظ التكرار التسلسلي للأنماط بين الوُحيدات المتجاورة. (تقدمة د. فرد نيهوت، من كتابه [نموّ وتطوّر أنماط جناح الفراشة] *The Development And Evolution Of Butterfly Wing Patterns*، استخدمت بإذن من مطبعة مؤسسة سميثسونيان).

عشوائية أكثر من غيرها إنها تبدو كذلك بسبب تغيّر الموقع أو التموضع الخاطئ للأشرطة بين وحيدات الجناح المتجاورة.

إن الملاحظة الأكثر أهمية حول هذه الأنماط هي قدرة الشريط الواحد أو البقعة الواحدة على تطوير شكلها ولونها وحجمها مستقلة



الشكل 3,8 **التفاوت في المخطط الأساسي.** الأنواع الثلاثة (أ) *ستيكوفثالما كامادیفا* (*Stichophthalma camadeva*)، (ب) *فاوريس مينادو* (*Fauris menado*)، (ج) *تيناريس ماكروبس* (*Taenaris macrops*)، تُمثل جميعها درجات مختلفة من المخطط الأساسي: يظهر بعضها فعلياً جميع عناصر المخطط، أمَّا البعض الآخر فيظهر أجزاء قليلة (الصورة تقدمة د. فرد نيهوت).

عن العناصر الأخرى، مما يشير إلى أنَّ نمو عناصر النمط الواحد يمكن أن يفصل بعضه عن بعض.

ما الذي اخترعه الفراش؟

إن الجمال والتنوّع المذهل لأجنحة الفراش ناجم على الأقل عن ثلاثة اختراعات حدثت بعد انفصالها عن بقية الحشرات. تتضمن هذه الاختراعات حراشف الجناح، والتلوين، ونظام التنميط الهندسي.

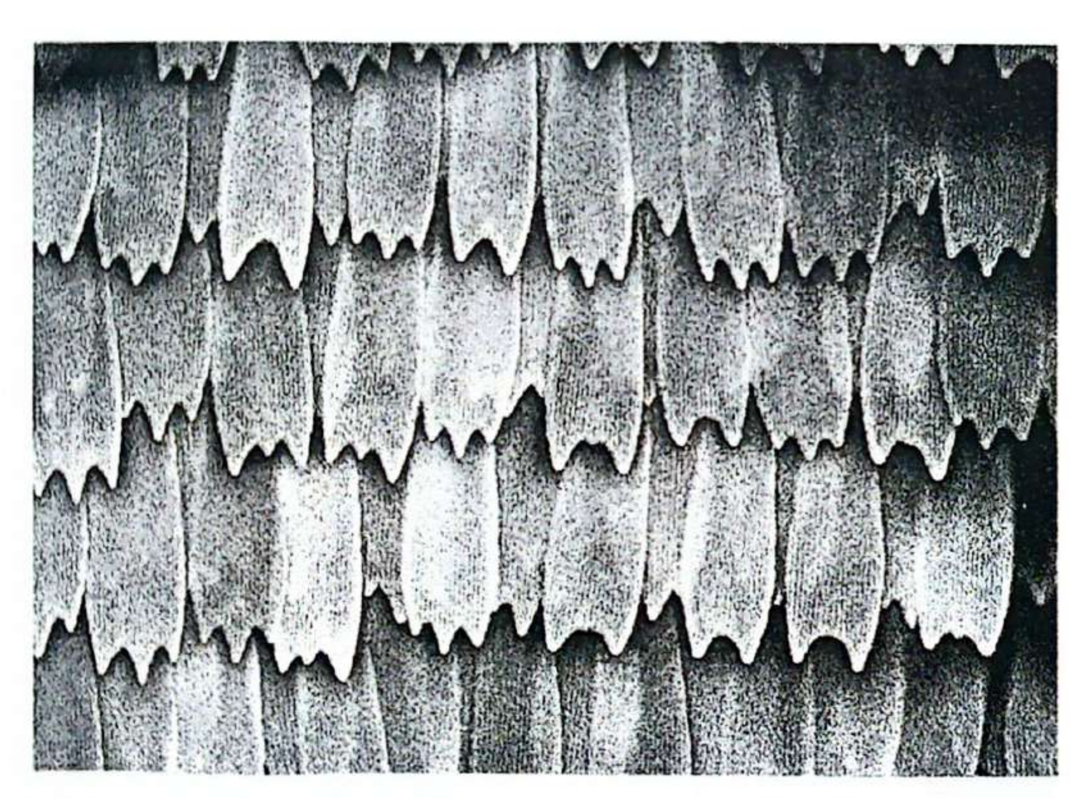
الحراشف هي الوحدات الأساسية لأنماط جناح الفراشة والعثة. الرتبة التصنيفية التي تنتمي لها هذه الحشرات هي لبيدوبترا

(*Lepidoptera*) والتي تأتي من الكلمتين اليونانيتين *lepis* التي تعني حرشفة أو قشرة، و*ptera* التي تعني «كائن مجنح». اختُرعت الحراشف قبل أنماط ألوان الجناح المتألقة، ولربما كانت وظيفتها الأولى عملية تماماً. إذ لو حدث أن قبضت على عثّة في يدك أو بين أصابعك، للاحظت ذرات «غبار»، هذه هي الحراشف. الانفصال السهل للحراشف هو ميزة لهذه الحيوانات ذات الأجنحة الكبيرة في تحرير أنفسها من الأماكن اللزجة كشباك العناكب.

تُغطَّى أجنحة الفراشة والعثّة كلياً بالحراشف، والحرشفة الواحدة منها نتاج خلية واحدة (الشكل 4,8). اعتقد علماء الحشرات لفترة طويلة أن الحراشف تطورت كتعديلات على هلب الاستشعار لتغدو مسطحة وعريضة بلا قوة استشعارية عوضاً عن كونها طويلة وأسطوانية مزوّدة بنهايات استشعارية. أكّدت دراسات الإيفوديفو هذا التصوّر، فقد وجد رون جالانت (Ron Galant) في مختبري أن الحراشف النامية تستخدم أحد جينات عدة الأدوات الذي يستخدم أيضًا لصناعة الهلب في الذبابة، ما يشير إلى أن الحراشف هي في واقع الأمر هلب معدّلة.

تضاهي حشرات قليلة الفراشَ في ألوانها. ويُمكن أن يرى عبر التكبير العالي أن كل حرشفة تحمل لوناً معيناً وقد يكون هذا اللون مختلفاً تماماً عن ألوان جاراتها (اللوحة 8 أ). إن تصوّر الجناح كألوان متمازجة أو وسيطة هو تأثير بصري ناتج عن الترتيب المكاني لحراشف مفردة ذات ألوان منفصلة. تنجم ألوان الجناح عن أصباغ كيميائية

وألوان بنائية[1]: فألوان الأخضر والأزرق المتقزحين اللذين تتغير ألوانهما بتغير زاوية الرؤية، إضافة إلى الأبيض الطحيني تنتج جميعاً عن الطريقة التي تمتص وتعكس وتبعثر بها الحراشف الضوء. والألوان البنائية المختلفة ناجمة عن اختلافات دقيقة في التشريح المجهري للحرشفة، وأيضاً ناجمة عن التأثيرات المشتركة لبناء الحرشفة وتوليد أصباغ كيميائية معينة.

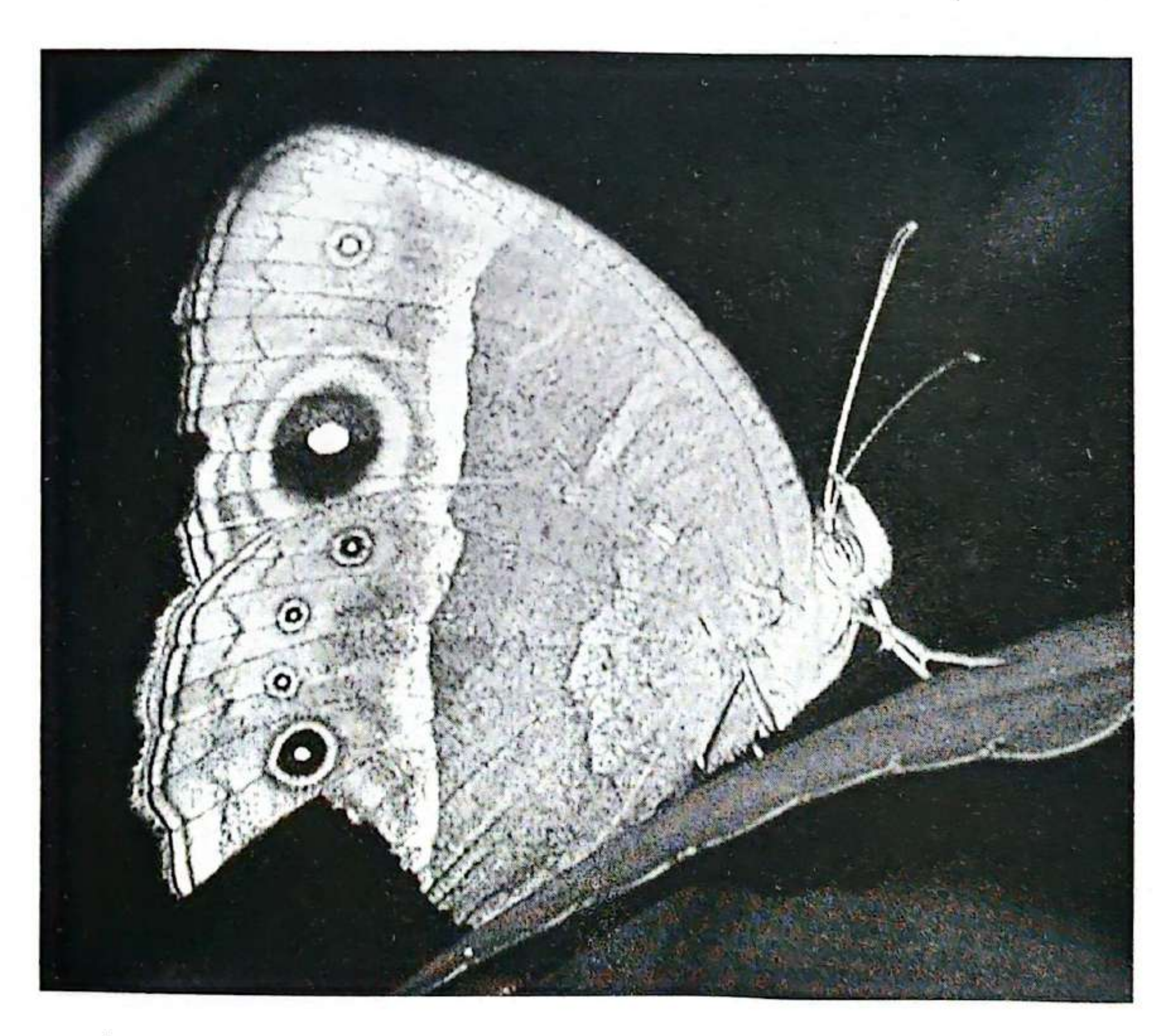


الشكل 4,8 حراشف جناح الفراشة (ستيف بادوك).

إن الأنماط الهندسية على الأجنحة ناجمة عن اختراع وتحسين مسارات نموّها، وتتركز أغلب معرفتنا عن أنماط الجناح جول نمط العُيينات. تتكوّن هذه البقع من حلقات متحدة المركز لحراشف مختلفة الألوان

(1) ألوان سببها طبيعة بناء الجناح.

(اللوحة 8 ب). بحثت العديد من الدراسات دور هذه البقع في تجنيب الفراش مفترسيها، وقد اُقْتُرِحَ أن العُيينات الموجودة في أنواع عديدة تقوم بصرف انتباه الحيوانات المفترسة (عادة ما تكون طيوراً أو سحالي) بعيداً عن الجسم الرئيسي الضعيف باتجاه الحافة الأبعد من الجناح. إن الفراشة التي تُقْتَطع من أجنحتها أجزاء معتبرة الحجم تظلّ قادرة على الطيران (الشكل 5,8)، بينما قد تكون لطمة على الجسم قاتلة. يمكن أن



الشكل 5,8 **تلفٌ أحدثه مفترس على فراشة.** تعرضت فراشة بيسايكلوس *أنينانا* (*Bicyclus anynana*) للهجوم، ولكن لأنَّ الضرر وقع على طرف الجناح، فإنه ما يزال بإمكانها الطيران والتكاثر (صورة مأخوذة في كينيا، تقدمة بول بريكفيلد، جامعة لايدن).

تجذب العُيينات الانتباه، إما بسبب علاماتها الجلية التي تبرز مقارنة ببقية جذع الجناح أو لإثارتها غريزة الحيوانات المفترسة لمهاجمة هذه الأنماط بسبب مشابهتها للعيون.

لقد شجعنا الدور المحوري للعُيينات في دفاع الفراشة، إضافة إلى تنوّعها الهائل بين الأنواع على تركيز جهودنا لفهم كيف تكوّنت وتطورت عناصر هذه الأنماط.

تكوين العُيينات:

تعليم الجينات الغابرة حيلاً جديدة

إن أنماط الجناح البالغ التي نشاهدها هي إكمال لعملية تبدأ في اليُسروع (يرقة الفراشة). ينشأ كل جناح من قرص مسطح من الخلايا التي تنمو بشكل هائل في أثناء المراحل العديدة لنموّ اليرقة (يملك أغلب الفراش خمس مراحل نموّ يرقية). يُكوِّن اليسروع بعد ذلك غلافاً حوله عند تحوّله إلى خادرة، وفي الغلاف يتم الانتهاء من تلوين النمط النهائي قبيل خروج الفراشة. ورغم كونها غير مرئية بالعين المجردة، تصنع بعض أجزاء نمط الجناح المستقبلي في اليُسروع في الفترة التي يكون فيها الجناح قرصاً غضاً وحجمه لا يتعدى جزءاً ضئيلاً من حجمه وهو بالغ، وما زال أمام الخادرة أسبوع أو أكثر قبل أن تخرج منها الفراشة البالغة. لقد وصفتُ في الفصل الثاني أحد أكثر التجارب إثارة والتي أضاءت الأحداث المبكرة في أجنحة الفراشة، أعني تلك التجارب التي أجراها فرد نيهوت المتعلقة بازدراع (transplanting) بؤرة العُيينة. لقد أظهر فرد أن الموقع المستقبلي للعُيينة يحسم في

اليُسروع، واكتشف أن أنماط الحلقات متحدة المركز للعُيينات تُحفَّز على النموّ من قِبل المعضِّي المسمى بالبؤرة الذي يقع في مركز العُيينة النامية.

ولأن تجارب الازدراع التي أجراها فرد قد أظهرت وجود معضٍ جديد في جناح الفراشة النامي، فقد بدأنا في مختبري محاولة تحديد الجينات الداخلة في تكوين العُيينة. كانت أسئلتنا الرئيسية: ما هي طبيعة النظام الجيني الذي يُولِّد الأنماط المفردة؟ كيف تطوّر هذا النظام؟ ما هي الأدوات الجينية التي استخدمت لنقش «ألواح» بيتس؟ هل طور الفراش جينات جديدة لصناعة البقع؟ أم أنه استخدم الجينات المتوفرة؟

قادنا حدسنا. كان مختبرنا ومختبرات أخرى قد أحرزت تقدماً جيداً في تحديد بروتينات عدّة الأدوات الداخلة في تكوين جناح ذبابة الفاكهة. وكان المنطق الذي اعتمدنا عليه في معالجة مسألة تكوين أجنحة الفراشة هو الاعتماد على العلاقات التطوّرية بين الحشرات. ولأن أجنحة الحشرات تطوّرت مرة واحدة فقط، فما عرفناه عن تكوين أجنحة ذبابة الفاكهة ينبغي أن ينطبق، على العموم، على تكوين أجنحة الفراشة. وقد أملنا، إن حالفنا الحظ، في الحصول على أدلة عن المميزات الفريدة لأجنحة الفراشة من خلال دراسة نظراء عدة أدوات ذبابة الفاكهة في الفراشة.

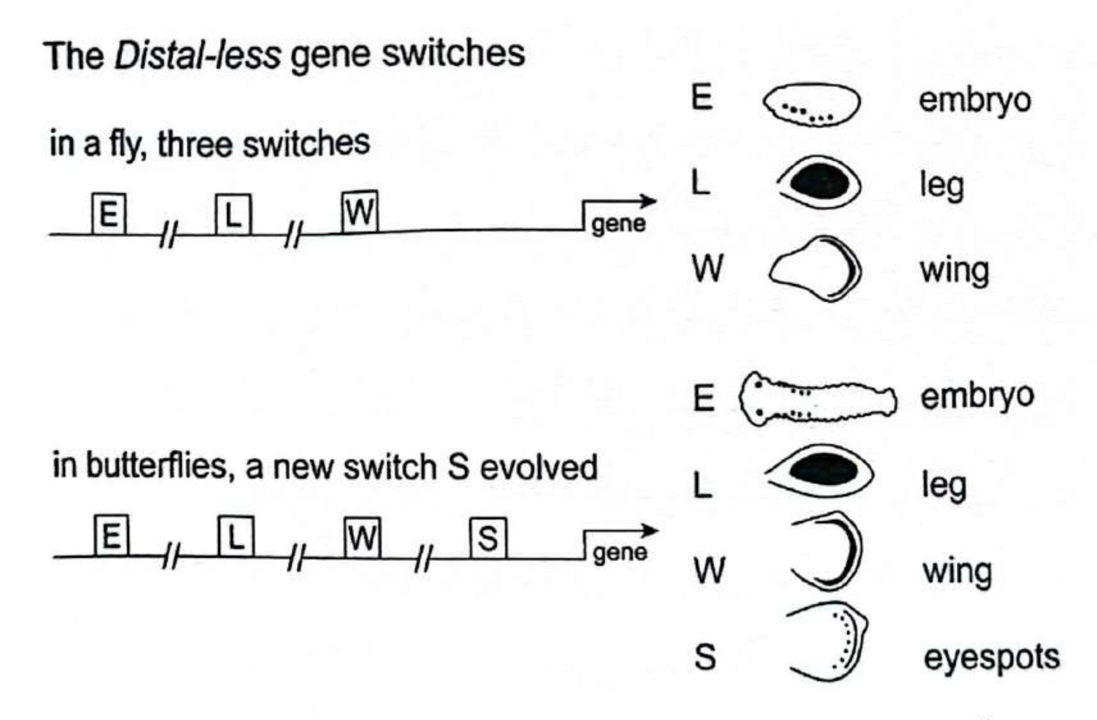
قام فريق من العلماء في مختبري بعزل عدد من جينات عدة أدوات فراشة البكآي (Buckeye) (عين الغزال)، التي علمنا أن أندادها تشارك في صناعة وتنميط أجنحة ذبابة الفاكهة. لم يكن وجود هذه الجينات في الفراش مفاجأة، ولم يكن أيضًا ليشكل دليلاً

على دورها في تنميط الأجنحة. لكن التحدي هو مدى استطاعتنا وضع أيٍ من هذه الجينات في خريطة تنميط جناح الفراشة في الوقت الذي ينشأ فيه النمط كما حدّدته تجارب الازدراع. وقد توجب علينا لإجراء التجارب أن نفحص مواقع نشاط الجينات في أقراص الأجنحة الضئيلة في اليُسروع. لقد أردنا أن نرى بالمجهر لمحات عن الكيفية التي تصنع بها الأنماط الجميلة التي ستظهر لاحقاً في الفراشة البالغة.

وجدنا أن جميع جينات الفراشة قد نشطت في مناطق بقرص جناح الفراشة النامية تقابل ذات المناطق الجغرافية حيث تنشط في أجنحة ذبابة الفاكهة. أنبأنا ذلك عن وجود جغرافيا مشتركة لأجنحة الحشرة النامية. الأسطح العلوية والسفلية، ومقدمة ونهاية كل جناح، إضافة للحواف كلها تُحدَّد بذات الجينات في كلا النوعين. وقد كان هذا تأكيداً لطيفاً على المحافظة على التصميم الغابر للجناح. لكن الأكثر فتنة وإثارة كان أنماط النشاط الجيني التي رأيناها في أجنحة الفراشة والتي لا نظير لها في أجنحة ذبابة الفاكهة. لن أنسى أبداً تلك اللحظة التي استدعتني فيها الفنية العاملة بمختبري جولي جيتس (Julie Gates) إلى المجهر لرؤية النمط الأكثر إذهالاً للبقع الجميلة في أقراص جناح اليُسروع. رأينا زوجين من البقع على كل قرص متموضعة بدقة كبيرة حيث ستظهر العُيينات بعد أسبوع من النموّ في تلك المواقع التي حددها فرد نيهوت كبؤر للعُيينات (اللوحة 8 ج).

صُنعت البقع من قبل جين واحد من بين دزينة الجينات التي درسناها. لقد قرأتَ عنه كثيراً -إنه جين *Dll*. لقد كان ذلك مثيراً جداً

لأنه أشار إلى أن ذات الجين الذي شارك في تكوين أطراف ذبابة الفاكهة وأطراف المفصليات يفعل شيئاً جديداً في أجنحة الفراش. لقد حافظ *Dll* على وظيفته القديمة فقد انتشر أيضًا في الأجزاء البعيدة في جميع أطراف الفراشة النامية، كما هو الحال في جميع الحشرات والمفصليات. وكانت مواضع نشاط *Dll* في أجنحة الفراشة حيلة جديدة «تعلمها» بعد فترة من دوره الغابر في تكوين الطرف (الشكل 6,8). تذكر أن كل ما يتعلق بعمل بروتين عدة الأدوات يعتمد على السياق. فجين *Dll* يقوم بدوره في بناء الطرف في أماكن وأوقات محددة، بينما يكون دوره في بقع الجناح في مكان ووقت آخر ويتحكم في نمط مختلف كلياً.



الشكل 6,8 **تطور مفتاح جيني جديد لنشاط العيينة في جين *Dll* بالفراشة.** يمتلك الذباب والفراشات مفاتيح في جين *Dll* تتحكم بنشاطه في أرجل اليرقة والجناح في الجنين، لكن الفراشات طورت مفتاحاً إضافياً للتحكّم بنشاط هذا الجين في العُيينات (رسم ليان أولدز)

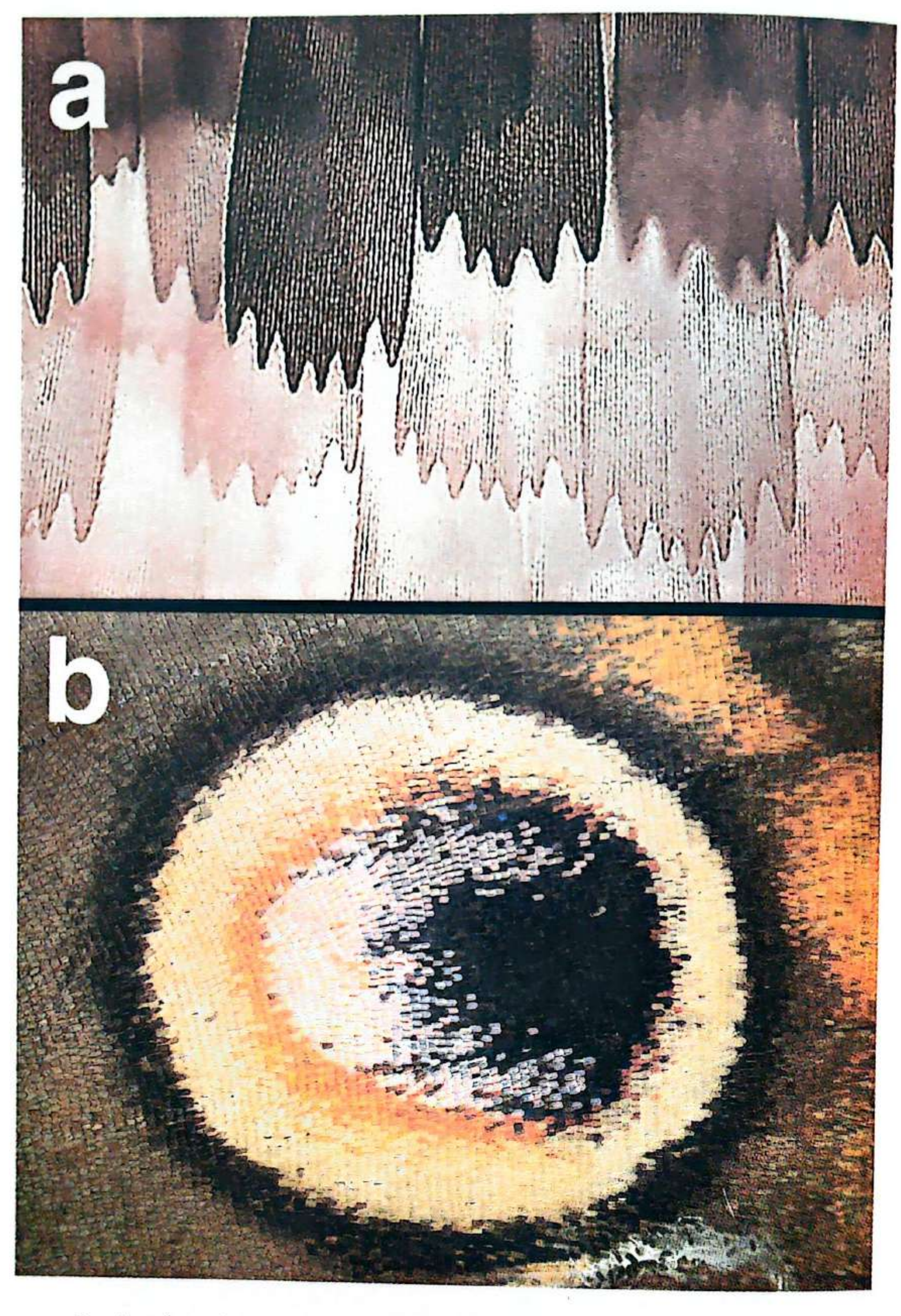
كيف تعلم *Dll* الحيلة الجديدة لصناعة بقع على الجناح؟ اكتسب الجين مفتاحاً جديداً يستجيب لخطوط الطول والعرض المحددة لهذه البقع الخلوية. تتكون بقع *Dll* دائماً بدقة بين عرقين وعلى طول الطرف الخارجي من الجناح. وتنبئنا الإحداثيات الدقيقة والمتكرّرة لهذه البقع أن هناك بروتينات لعدة الأدوات تنشط في هذه المواقع مشغلة المفتاح في جين *Dll*.

لقد منحنا اكتشاف نشاط *Dll* في العُيينات النامية في فراشة البكآي موطئ القدم الذي كنا نطمح إليه، فقد أوعز إلينا ذلك أنه بوسعنا فهم الكيفية التي كُوِّنت بها هذه الأنماط المعقدة. إلاَّ أن أحد أوائل الأسئلة التي واجهناها: هل كان اكتشافنا قاعدة عامة تتعلق بأنماط جناح الفراشة أم أنهاَ خاصة بنوع واحد؟ لذلك درسنا الكيفية التي يستخدم فيها *Dll* في الفراشات الأخرى سواء امتلكت أم لم تمتلك بقعاً. ورأينا علامات جميلة لنشاط *Dll* في جميع الأنواع ذات البقع، ولم نرَ تلك العلامات في الأنواع عديمة البقع (اللوحة 8 د).

شجعنا طالعنا الحسن على البحث عن البروتينات الأخرى لعدة الأدوات التي تنشط أيضًا في العُيينات النامية. لقد اعتقدنا بلزوم وجود بروتينات أخرى تنتظر الاكتشاف لأن العُيينات تتكون من دوائر متّحدة المركز من الحراشف المختلفة الأصباغ، وبطريقة ما استلمت كل حلقة من الحراشف تعليمات مختلفة. أشارت تجارب فرد نيهوت إلى أن الإشارات الصادرة من البؤرة تحث الحلقات المجاورة من الخلايا لتحمل ألواناً مختلفة حسب بعدها عن البؤرة. لقد لوّن *Dll* خلايا المركز، لكن لا بدّ من طريقة أخرى لتلوين الحلقات الأبعد.

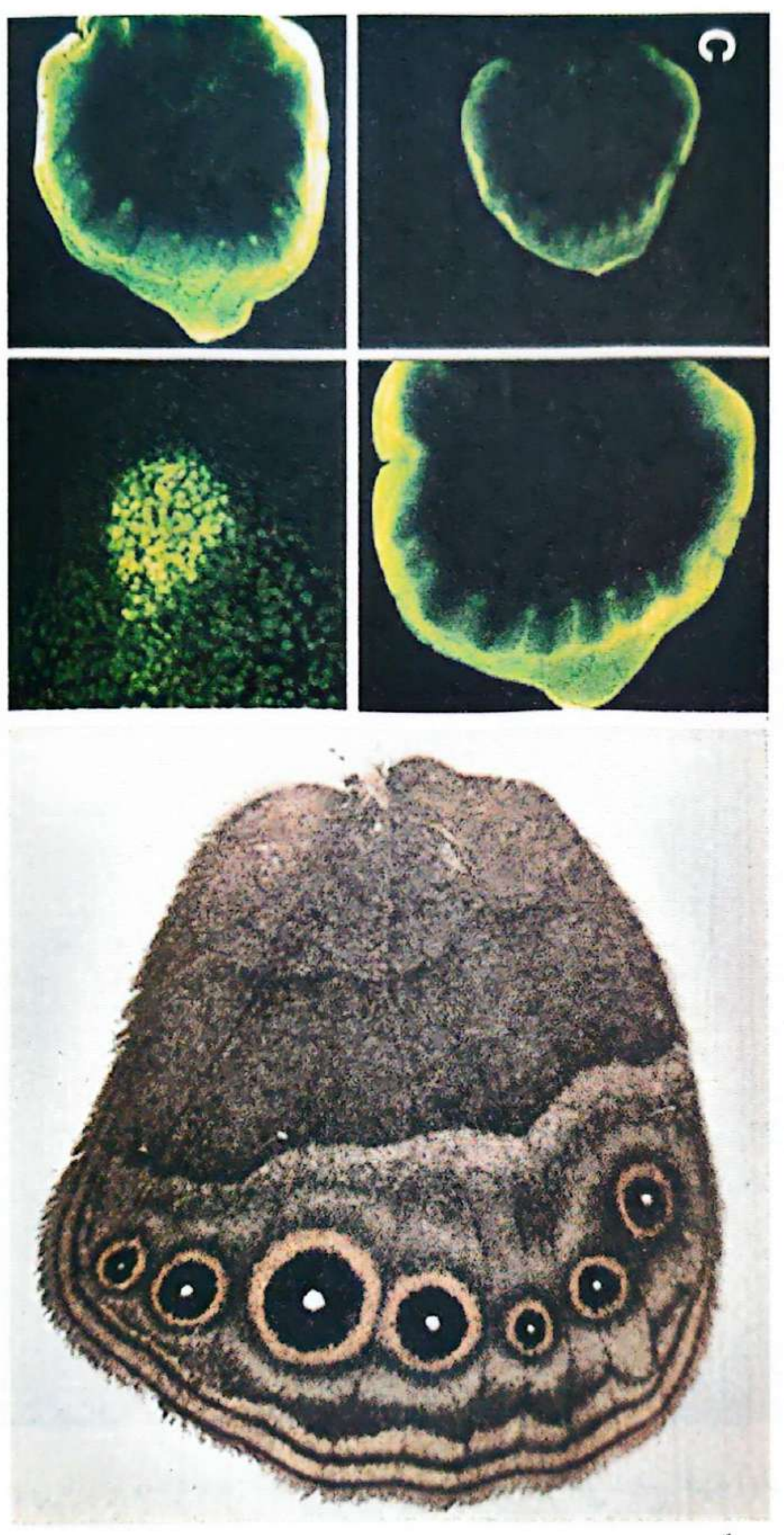
حالفنا الحظ مرة أخرى. قام كريج برونيتي (Craig Brunetti)، في أثناء إجرائه أبحاث الزمالة الأكاديمية في مختبري، بالبحث عن بروتينات أخرى لعدة الأدوات في عُيينات الفراشة، فوجد نمطين مذهلين آخرين. عندما تفحّص نشاط بروتينين من عدة الأدوات يسميان سبالت (Spalt) وإنجريلد (Engrailed)، وجد أنهما ينشطان على التوالي في بقعة وحلقة في النوع الإفريقي بيسايكلوس *أنينانا* (*Bicyclus anynana*) (اللوحة 8 هـ). تمتلك العُيينات في هذا النوع مركزاً أبيضَ محاطاً بحلقة سوداء عريضة، محاطة هي الأخرى بحلقة ذهبية. وبدقة علَّم نمط سبالت الحلقة السوداء المستقبلية، بينما عمل نمط إنجريلد الشيء ذاته للحلقة الذهبية. (تبدو تفاصيل التماثل بين حلقات النشاط البروتيني في الحراشف النامية والحلقات المستقبلية للعُيينات مدهشةً جمالياً في الصورة الملوّنة).

إن *إنجريلد وسبالت* جينان غابران جداً ولهما وظائف أخرى، ولذلك فإن تفسير وظائفهما الجديدة في تنميط العُيينات في الفراشة شبيه بتفسيرنا لجين *Dll*: تمكن هذان الجينان من اكتساب وظائف جديدة في الفراشات عبر تطويره مفاتيح جديدة للتحكم في نشاطاتهما.

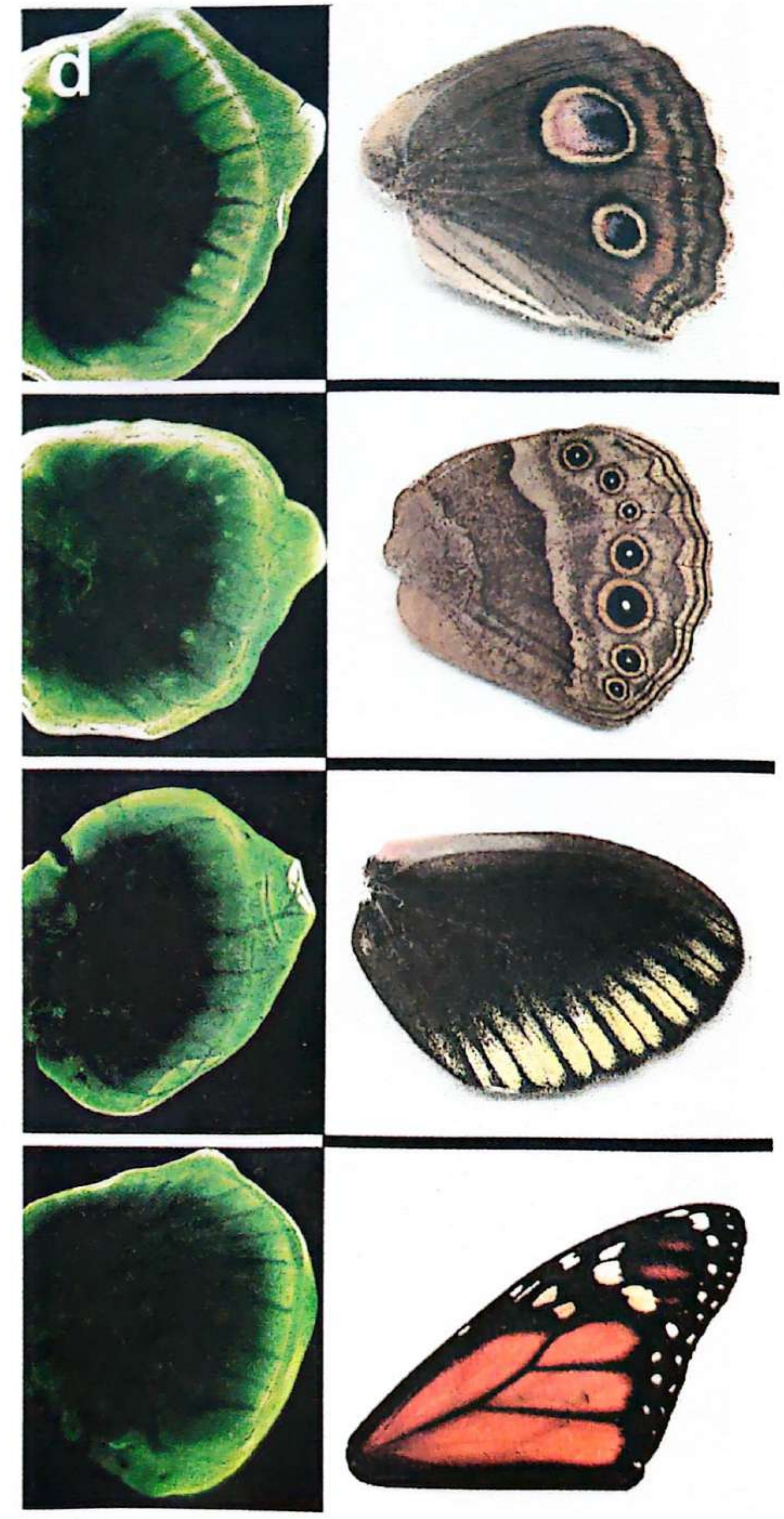


8 أ. صورة مكبّرة لحراشف جناح الفراشة. كل حرشفة هي نتاج خلية واحدة.

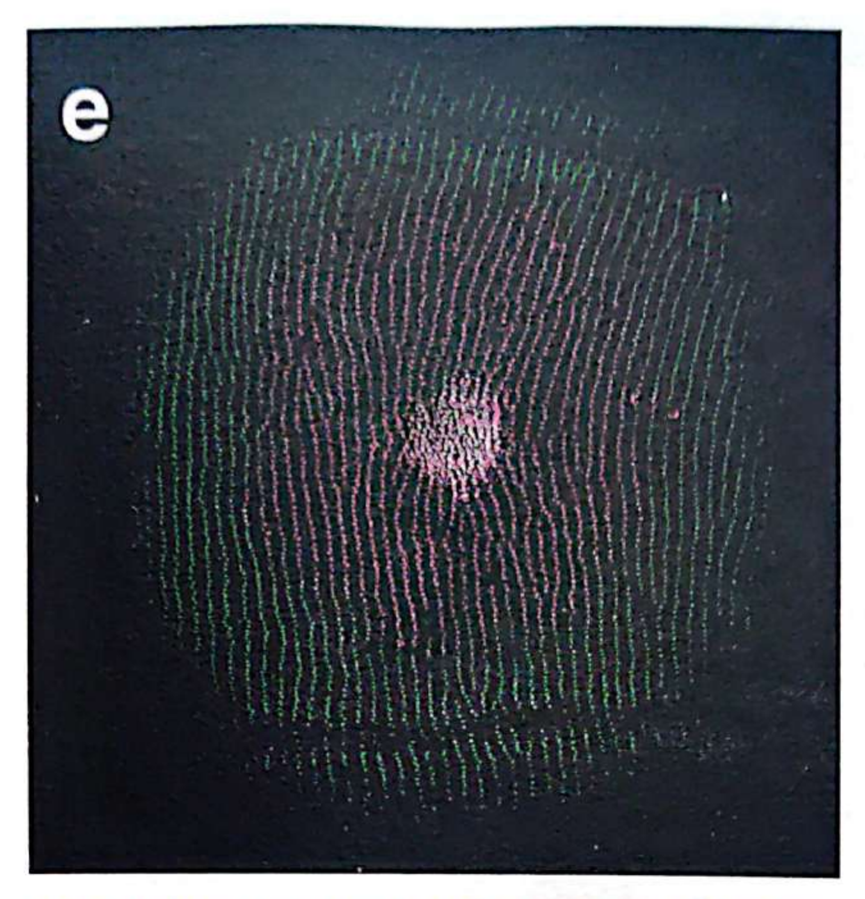
8 ب. صورة مكبّرة لعُيينة في الفراشة يظهر فيها تشكيل نمط اللون من قبل صفوف من الحراشف. لاحظ أن كل حرشفة عبارة عن لون واحد، وهناك حراشف «شاردة» توجد في مساحات لونية مغايرة.



8 ج. يُعلِّم نشاط بروتين عدة الأدوات *Dll* في جناح اليُسروع المراكز المستقبلية للعُيينات في الفراشة. يتألف نشاط بروتين *Dll*، كما يظهر باللون الأخضر، من بقع صغيرة (تظهر بالتكبير العالي في أسفل يمين لوحة الصور الصغيرة). تُعلِّم البقعُ موقعَ المراكز البيضاء (لوحة الصورة الكبيرة) في العُيينات البالغة التي ستنمو بعد أسبوع.

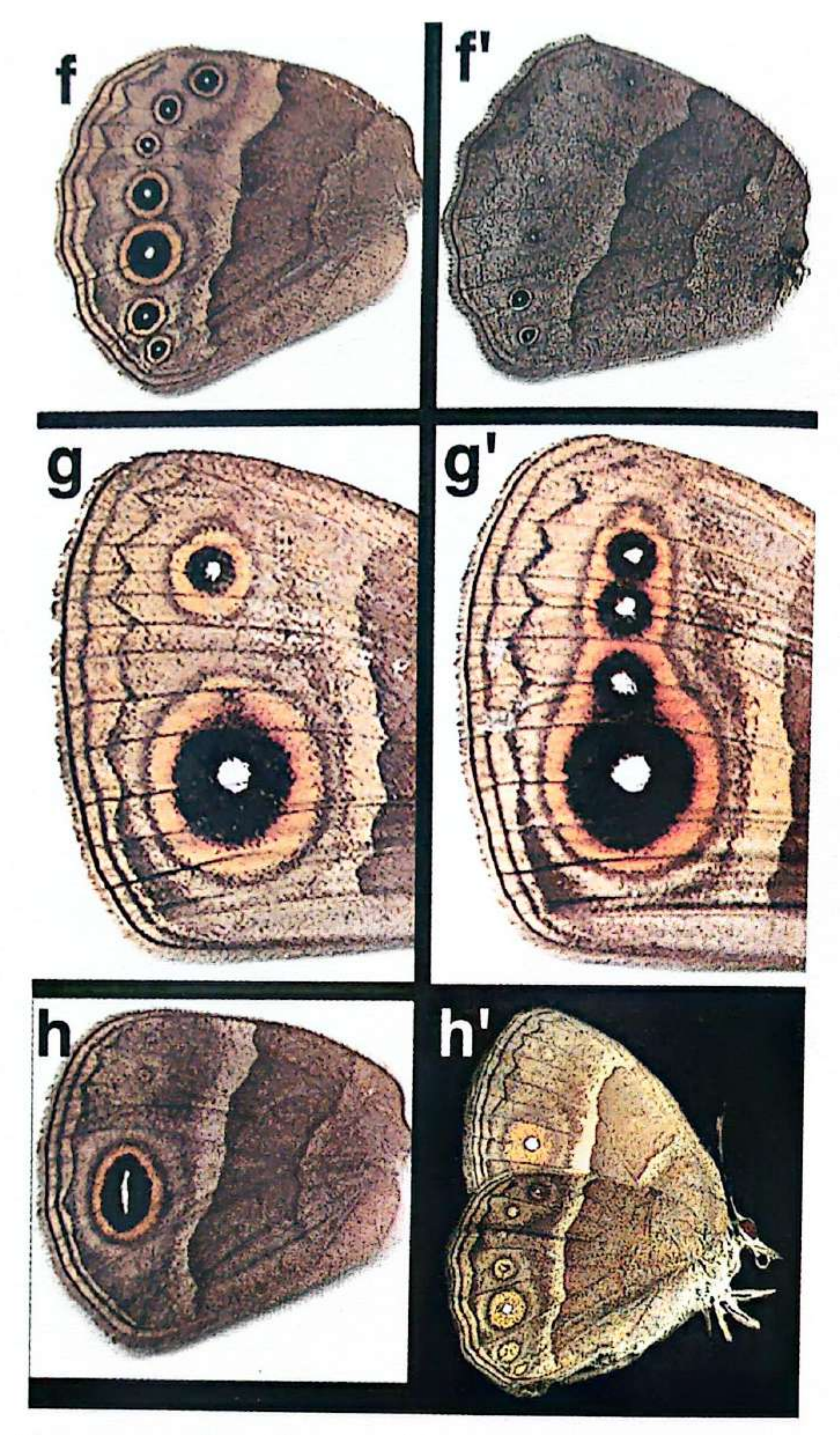


8 د. يتلازم نشاط بروتين Dll في البقع مع حضور أو غياب البقع في أنواع مختلفة. في العمود الأيسر، نشاط Dll في الأجنحة النامية في اليُسروع في أربعة أنواع حيوانية، وفي العمود الأيمن تظهر الأنماط ذاتها وقد وصلت مرحلة البلوغ.





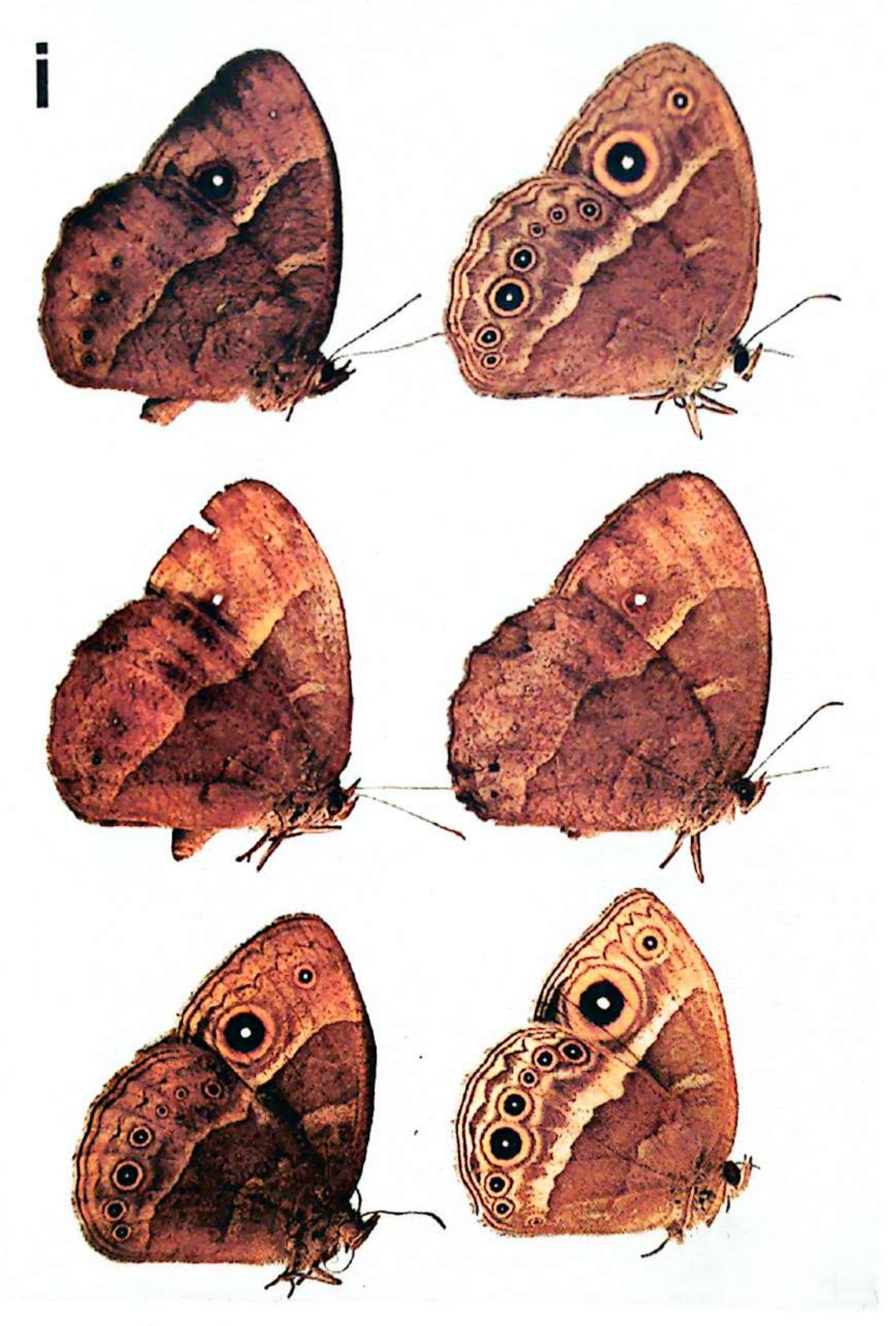
8 هـ. تُعلِّم مختلف الحلقات المستقبلية في العيينة البالغة ببروتينين مختلفين من عدة الأدوات في أثناء مرحلة الخادرة (الحلقتان الخضراء والبنفسجية، ويتداخل اللونان في المركز). هذه الحلقات تُعلِّم الحلقات البيضاء والسوداء والذهبية المستقبلية في الفراشة البالغة التي ستتكوّن بعد أسبوع. كريج برونيتي.



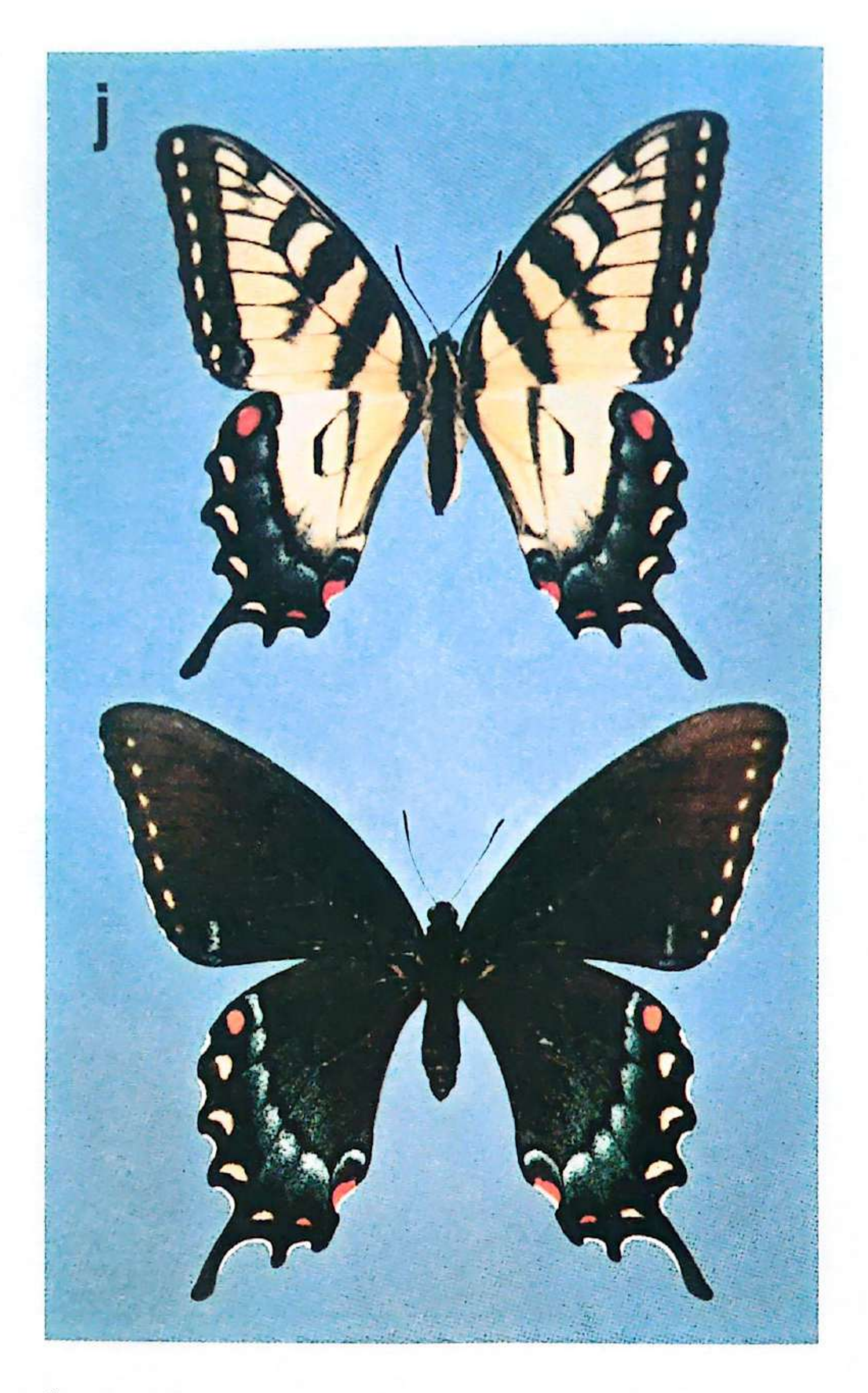
8 و. أشكال موسمية مختلفة من الفراشة الأفريقية بيسايكلوس *أنينانا*. يسار: شكل الجناح الخلفي في الموسم الرطب. يمين: الجناح الخلفي في شكل الموسم الجاف مع عُيينات صغيرة. (الصور تقدمة بول بريكفيلد، جامعة لايدن).

8 ز. تحتوي الطافرة *المبقعة* على بقعتين دائريتين إضافيتين على جناحها الأمامي. (الصورة تقدمة بول بريكفيلد، جامعة لايدن)

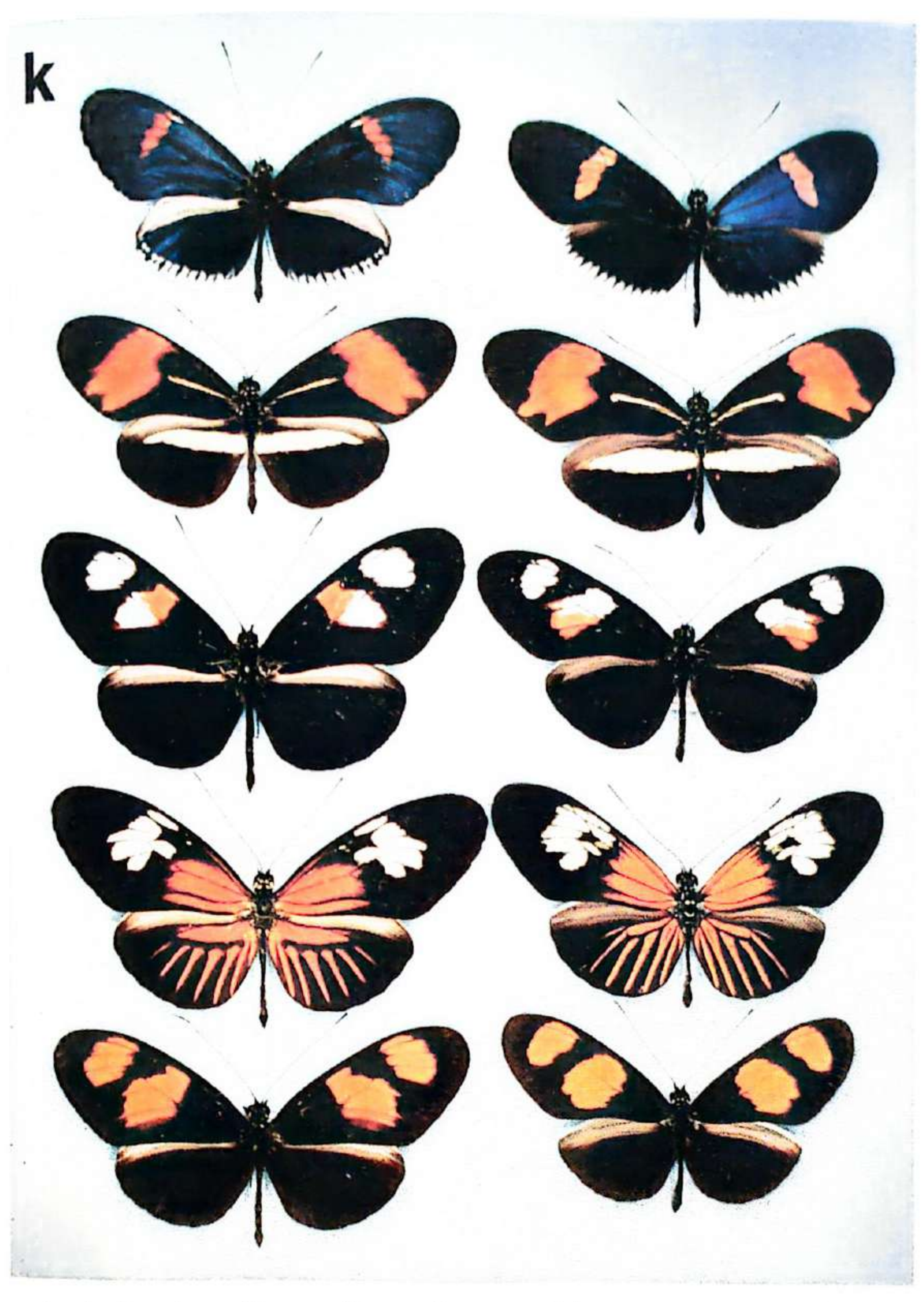
8 ح. فراشات طافرة ذات بقع كبيرة، أو بقع شاذة، أو بقع ذات ألوان متغيرة. (الصورة تقدمة بول بريكفيلد، جامعة لايدن)



8 ط. انتخاب حجم العُيينات الكبيرة والصغيرة في بيسايكلوس *أنينانا*. الصف العلوي: أشكال الموسم الرطب والجاف. الصف الوسطي: سلالة منتخبة ذات عُيينات صغيرة أنشئت في درجات حرارة الموسم الجاف والرطب. الصف السفلي: سلالة منتخبة ذات عُيينات كبيرة أنشئت في درجات حرارة الموسم الجاف والرطب. (الصور تقدمة بول بريكفيلد، جامعة لايدن).



8 ي. شكلان من فراشة النمر الخطافية الذيل. الأنثى السوداء محاكاة لفراشة الكرمة الأنبوبية الخطافية الذيل.



8 ك. المحاكاة في فراش *هيليكونيس*. اللونان الأصفر والأحمر لونا التحذير في الفراش. يعرض كل صف عينات من هـ. *ميلبومين* (يسار) وهـ. *إيراتو* (يمين) وجدت في منطقة جغرافية واحدة. انظر الاختلافات الجغرافية في النوع الواحد والتشابه اللافت بين أفراد الأنواع المختلفة الموجودة في ذات المنطقة. (لصور تقدمة هـ. فرد نيهوت من كتابه [*نمو وتطور أنماط جناح الفراشة*]

The Development And Evolution Of Butterfly Wing Patterns، استخدمت بإذن مطبعة مؤسسة سميثسونيان).

دقائقي الخمس عشرة

اسمحوا لي أن أقاطع باقتضاب عرضي للمادة العلمية كي أحكي قصة صغيرة عن النتائج غير المتوقّعة لاكتشافات غير متوقّعة. لقد علمتني هذه القصة درساً كبيراً عن أن الجمال محرّك للاهتمام العام بالعلم.

بعد الإثارة التي تملكتنا عقب رؤية دور *Dll* في بقع الجناح، كتبنا نتائجنا للنشر الرسمي في الدوريات العلمية. لكننا اكتشفنا سريعاً أن الجميع لا يشاركنا تلك الإثارة، فقد رفضت دورية *نيتشر* (*Nature*) بحثنا دون مزيد من المراجعة. إن لم تنجح في المرة الأولى فعليك بالثانية. لذلك أرسلنا المادة لدورية *ساينس* (*Science*)، وقد كان محرروها أكثر ترحيباً وقرروا نشر عملنا وعرض صورة لجناح فراشة على غلاف العدد. كان ذلك بكل بساطة إنجازاً عظيماً للفريق حيث إن المهمة قد أكملت.

ولكن بطرق أخرى فإن الحكاية قد بدأت لتوها.

تستغرق الورقة العلمية عادة شهرين على الأقل لتُنشر، لذلك فقد نسيت أمر تلك الورقة تماماً عندما شاركت في مؤتمر علمي لاحقاً. كنت أقيم خلاله في حرم جامعي، أنام بإحدى غرفه، وأتناول طعام الكافتيريا، وأمتع نفسي بالسحر المعتاد للعالم الأكاديمي. بيد أني تلقيت رسالة للاتصال بنيكولاس ويد (Nicholas Wade)، وهو كاتب علمي لجريدة *نيويورك تايمز*، في أثناء استماعي لعروض زملائي.

اتصلتُ به محتاراً، ثم اكتشفت أنه يُعِّدُ مقالة خاصة عن بحثنا الذي كان على وشك الظهور في دورية *ساينس* (*Science*). اعتقدت أنها

خطوة ذكية، لأنها ستمنح أمي وجيراني الفرصة ليعلموا فيم قضيت سنوات الدراسة والليالي في المختبر. خضنا نقاشاً طويلاً على الهاتف، ثم رجعت للاجتماع وأيام أخرى من المداولات العلمية.

كانت بعض التغطية الإعلامية كافية، إلاّ أن مقالة *التايمز* دفعت صحفاً عديدة لتغطية الخبر. كان حينها فصل الصيف، وقد أبلغتني صحيفة بارزة أنهم يريدون شيئاً لطيفاً ليتصدّر الصفحة الأولى كي يبعدوا عنها خبر المحاكمة الشهيرة التي كانت تجري لأو. جي. سيمبسون (O. J. Simpson) في جريمة قتل. وهكذا فقد كتبت صحف عديدة تغطيات عن إيجاد «سر الجمال» كما جاء في إحدى الصحف.

أتى التلفاز بعد ذلك. كنت جالساً على العشاء عندما تعرفت إلى صورنا تذاع في برنامج الأخبار الوطني. تابعت المشاهدة مندهشاً، ثم تبع الصورة تقرير مصوّر طويل أعده روجر روزنبلات (Roger Rosenblatt) الذي دفعته ورقتنا العلمية للتساؤل إن كان الفهم العلمي يزيد أم يُنقص حِسَّنا بالدهشة والجمال (أظن باستطاعتك تخمين إجابتي).

بعد شهور، قررت مجلة *تايم* أنه ينبغي أن أُكرَّم ضمن مجموعة من الأمريكيين الشباب. وجدتُ نفسي في نهاية المطاف في ملابس السهرة على عشاء مع الرئيس، وحشد من صحافة واشنطن، ونجوم أفلام متعدّدين وساسة (هامش: العديد من الممثلين أقصر في الواقع مما يبدون عليه في الشاشة).

وكان للجنون فصلٌ آخر. فجأة تلقيتُ اتصالاً من أحد أهم منتجي هوليوود وقد قرأ مقالة *التايم* وأراد فقط أن يحادثني وجهاً لوجه.

وبالطبع ذهبت للوس أنجلوس وقضينا وقتاً ممتعاً في الحديث عن العلم والأفلام والفراشات.

حسناً، لقد فهمت الآن، إن الفراشات تثير اهتماماً عريضاً، وأنا ممتنٌ لذلك، وممتنٌ لخمس عشرة دقيقة كنت فيها تحت الأضواء.

بطبيعة الحال، هناك نقّاد في كل مكان. ولا أستطيع مقاومة رغبتي في مشاركتكم رسالة وصلتني من مجهول في أثناء كرنفالي الإعلامي الصغير (الشكل 8 ,7). متشوق أن يسمع هذا الفتى عن هذا الكتاب.

كيف تغيّر الفراشات بقعها؟

في قصة كِبلنج الخيالية، حينما حصل النمر على بقعه فإنه رضي بها ولم يغيّرها قط. لكن للفراشة تفكيراً آخر غير تفكير النمر، فقد تضمّن تطوّرها تغيّر البقع مراراً وتكراراً. يتضح ذلك حينما ننظر إلى أنواع مختلفة، لكن سأبدأ بقصة فراشة في ملاوي تغيّر بقعها بانتظام كلما تغيّرت المواسم.

كل ما تعلمته عن *بيسايكلوس أنينانا* علّمنيه بول بريكفيلد (Paul Brakefield) وطلابه في جامعة لايدن (University of Leiden) بهولندا، وأيضًا فيرنون فرنش (Vernon French) في جامعة إدنبره (University of Edinburgh). لقد درس بول هذه الفراشة الرائعة سنوات طويلة في الميدان، في ملاوي، وفي مختبره في لايدن حيث يحتفظ بول بمجموعات ضخمة منها.

It's a shame that you
brains can't get together
to help solve the earth's
problems instead of using
your God-given talents
and our TAX money to
figure out the genes that color
butterfly wings – Who Cares?!
Do Something about
our Envoirment – figure
out why people can't live
together in peace –
even I've figured this
one out.
Forget about God and
He'll forget about us
and this is what's
happening NOW.!!

الشكل 7,8 رسالة من معجب.

تكيفت ب. *أنينانا* في موطنها بأدغال ملاوي على الاختلافات الموسمية القوية عبر تعلّمها تغيير بقعها. في الموسم الرطب، حينما تكون الأوراق خضراء ووفيرة، يحمل هذا النوع عُيينات كبيرة بارزة على أجنحته لتساعده في النجاة من هجمات الطيور والسحالي (اللوحة 8 و، يسار). لكن في الموسم الجاف حينما تذبل الأوراق، وتكون مخلفات الأوراق بنية اللون، وحينما يجب على الفراشة أن تكون أقل نشاطاً، فإن تلك العُيينات الكبيرة ستشبه عيون ثور تبرز الأجنحة مقابل الخلفية البنية ولسان حالها يصرخ: «ها أنذا، التهموني». وعندما يبرد الطقس ويجف في نهاية الموسم الماطر، فإن الفقسات الأخيرة من اليساريع والخادرات تشعر بالتغيّر، لذلك لا تُظهر أية عُيينات، إنما رقطات ملونة ضئيلة حيث ستظهر العُيينات فيما بعد (اللوحة 8 و، يمين). ستخلد الفراشات البنية الفاترة للسكون مختفية على مخلفات الأوراق الميتة، وتنتظر حتى نهاية الفصل الجاف الطويل قبل أن يرجع المطر، حينها ستتزاوج. ستتحسّسُ ذريتها التي تنمو في بيئة رطبة ودافئة الطقس وتُنمّي عُيينات كبيرة تساعدها في الاحتماء في أثناء حالة النشاط الموسمي.

إن تكيّف هذا الفراش ليس مجرد قصة «متقنة»، فقد أطلق بول وطلابه فراشات بعُيينات كبيرة في الموسم الجاف ووجدوا أنه تم اصطيادها بمعدل أكبر من ذوات الشكل المتخفي في اللون البني الفاتر، وعليه فإن الدليل على الانتخاب الطبيعي جليّ في الطبيعة. وفي المختبر أدت تربية الفراش النامي في درجات حرارة مختلفة إلى إعادة إنتاج الأنماط الطبيعية، فدرجة حرارة 23 مئوية (73 فهرنهايت) تنتج شكل الموسم الرطب، ودرجة حرارة 17 مئوية (62 فهرنهايت) تؤدّي إلى نموّ شكل

الموسم الجاف. ومن خلال تغيير درجة الحرارة بين مستويات متعدّدة، حدّد بول وفريقه أن الفترة الحاسمة التي تحدّد حجم العُيينات موجودة في آخر مراحل نمو اليُسروع.

عندما درس تلميذي ديفيد كيز (David Keys) نشاط *Dll* في يساريع ب. *أنينانا* التي نشأت في درجات حرارة مختلفة، وجد علاقة دقيقة بين درجة الحرارة وعدد الخلايا المنشطة لبروتين *Dll* وحجم العُيينات البالغة. ففي درجات الحرارة الأدنى قلَّ عدد الخلايا المنشطة لجين *Dll* في البقع، بينما ازداد عددها بشكل ملحوظ في درجات الحرارة المرتفعة. يستجيب مفتاح العُيينات في جين *Dll* في هذا النوع على نحو مختلف لدرجات الحرارة المتباينة. لا نعتقد أن المفتاح يتحسّس مباشرة درجة الحرارة، ولكنه حسّاس لبعض الهرمونات التي تنتج في مناطق أخرى في جسم اليُسروع والتي تختلف مستوياتها باختلاف الموسم ودرجة الحرارة. تقوم الهرمونات في الحشرات، كما هو الحال في أجسامنا، بالتحكّم في مراحل النموّ، وفي نمو أنسجة معينة. وفي العمق يتم التحكم بتأثيرها (الاستجابة أو عدمها) عبر المفاتيح الجينية. لقد طوَّر مفتاح بقع جناح فراشة ب. *أنينانا* في جين *Dll* متوالية توقيعية تستجيب للهرمون، وبالتالي تمكنه من الاستجابة للتغيّرات البيئية.

إن القدرة على التحكّم بنمو البقع استجابةً لتغيّرات موسمية هو مثال واحد، لكنه مثال واضح، على كيفية تطوّر النموّ والشكل تحت تأثير الانتخاب الطبيعي. لقد نشأت جميع أنماط البقع في أثناء فترة تطوّر الفراشة. فعلى سبيل المثال يوجد أكثر من 80 نوعاً من الفراش في جنس *بيسايكلوس* وحده، ويختلف كل نوع عن الآخر في حجم، وموقع،

وأحياناً في عدد العُيينات، ما يشير إلى أن من السهل على الفراشات إلى حدّ ما تطوير أنماط جناح جديدة. ولربما كانت لدى الفراشة درجة أكبر من الحرية في تطوير أنماط جناح جديدة مقارنة بأبنية أخرى. قد يعود سبب هذه المرونة إلى أن طريقة التحكّم الجيني بتنميط الجناح منظمة بحيث لا تؤثر على أجزاء الجسم الأخرى. غالباً ما يبدو التطوّر في الفراش وكأنه مسألة «فرصة التقطت على جناح السرعة».

يمكننا أن نلقي نظرة على الطريقة التي تتطوّر بها أنماط أجنحة الفراش من خلال التفاوت في أنماط الجناح الذي نراه في المختبر والطبيعة. لقد عزل بول بريكفيلد وزملاؤه عدداً من الطافرات المدهشة من الطبيعة، التي احتوت على أنماط عُيينات مختلفة. وكان بعضها خالياً من أي تغيّرات أخرى في نمط الجسم. ولذلك ربما مثلت فئة من الطفرات القابلة للحياة في الطبيعة لانحصار تأثير الطفرات في الجناح فقط. وبالفعل فقد وُجد أن لأحد هذه الطافرات التي سميت *المبقّعة* (*spotty*) أربع عُيينات في الجناح الأمامي عوضاً عن اثنتين وهو العدد المعتاد (اللوحة 8 ز، يمين)، ولوحظ في الطبيعة وجود أنواع ذات صلة قرابة كبيرة منها ب. *سافيتزا* (*B. safitza*) التي تحوي أربع عُيينات. وعليه فإنه يسهل تخيّل كيف يمكن أن يتطوّر عدد العُيينات في هذه المجموعة. وقام بول أيضًا بعزل متحولات غيرت حجم وشكل وتنسيق ألوان العيون المموهة (اللوحة 8 ح) وذلك يشبه نوع الاختلافات الموجودة في الأنواع ذات صلة القرابة الكبيرة.

وفّرت تجارب التناسل المحاكية لعمليات الانتخاب الطبيعي في المختبر زاوية أخرى لرؤية عملية تطوّر الجناح. فعوضاً عن الطيور والسحالي

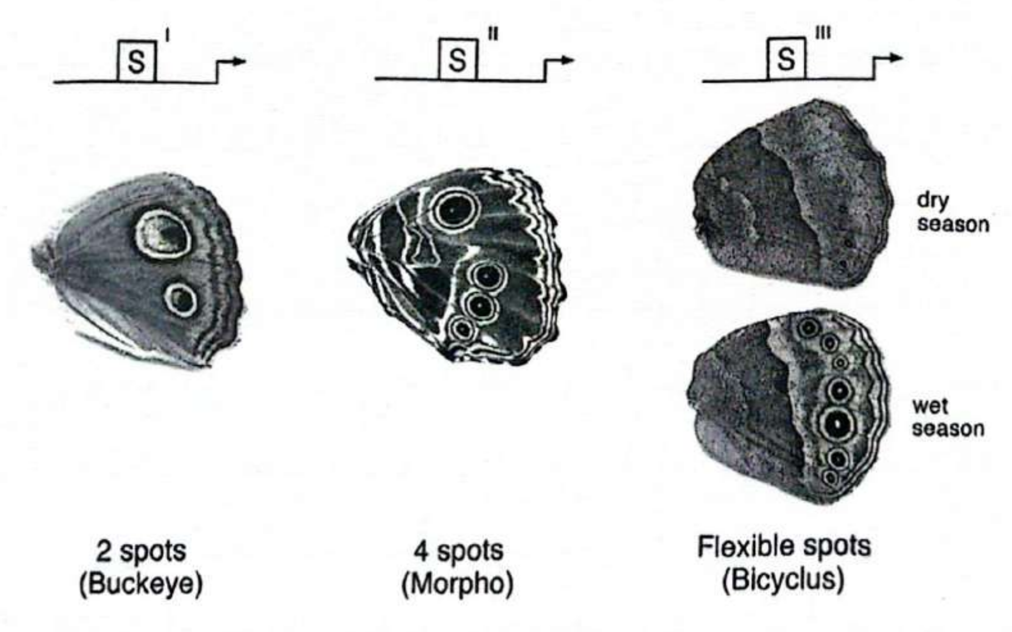
المفترسة، قام بول وتلامذته بتحديد مصير الفراشات ذات البقع المختلفة الأحجام. يوجد في أي مجموعة فراش تفاوت طفيف في حجم البقع، الذي بإمكانه توفير مادة خام للانتخاب الطبيعي في البرية أو «للانتخاب الاصطناعي» في المختبر. أسس بول وفريقه مجموعتين متمايزتين من الفراش، واحدة من خلال انتقاء ومزاوجة الفراشات ذات البقع الأكبر في درجات حرارة أبرد، وثانية من خلال انتقاء ومزاوجة الفراشات ذات البقع الأصغر في درجة حرارة أدفأ. حصل الفريق بعد حوالى عشرين جيلاً من برنامج الانتخاب الاصطناعي على مجموعات فراش إما ذات بقع كبيرة أو صغيرة مستقلة عن تأثير درجة الحرارة (اللوحة 8 ط).

ما حدث في هذه التجارب هو تعرّض التفاوت الموجود في حجم العُيينة، والناتج عن التفاوت الجيني في مجموعات الفراش الابتدائية، للانتخاب نحو اتجاهين متطرّفين (إنتاج بقع كبيرة وصغيرة)، مما أدّى إلى إنتاج مجموعات مختلفة جينياً ومظهرياً. وفي حقيقة الأمر فإن هذا يطابق ما يحدث في الطبيعة، لكن الطبيعة تعمل عادة على أجيال أطول من عشرين جيل.

أظهرت هذه التجارب حول قابلية تغيّر العُيينات في *بيسايكلوس* بعض الإمكانيات الموجودة في تطوّر نمط لون جناح الفراشة، وقد حققت الفراشات في الواقع عملاً عظيماً في استكشاف هذه الامكانيات. أظهر تطوّر حجم عُيينات الجناح وعددها وتنسيق ألوانها درجة عظيمة من التنوّع في الأنواع الأخرى ذات العُيينات. ولا بدّ أن يكمن وراء التنوّع في أنماط جناح الفراشة تعليمات مختلفة للنموّ. ولقد منحنا اكتشاف نشاط بروتينات سبالت وإنجريلد و*Dll* في العُيينات القدرة

على رؤية كيفية تطور التفاوتات العديدة في ثيمة العُيينة في أنواع مختلفة.

الاختلاف الأكثر وضوحاً بين الأنواع هو تطوّر عدد العُيينات. إن تطوّر عدد البقع التي ينشط فيها جين *Dll* في أقراص الجناح يعكس بدقة تطوّر عدد العُيينات، وذلك يبلغنا بأن تغيّرات تطوّرية في التحكّم بجين *Dll* قد ظهرت بين الأنواع، ويظهر كيف أن إبداعاً واحداً كتطوّر البقع يقود لزيادة التنوّع في الأنماط. وبعدما تتطوّر العُيينات بفعل نشاط *Dll*، فإن العبث بنشاط هذا الجين ينتج فراشاً بعُيينات أكثر أو أقل، وبقع مختلفة الحجم، أو تغيّرات موسمية في العُيينات كما هو الحال في ب. *أنينانا*. ولقد نجمت تغيّرات التحكم في *Dll* على الأرجح عن تغير المتواليات التوقيعية لجين جين *Dll* المتحكم بالعُيينات (الشكل 8,8).



الشكل 8,8 **تعديل مفتاح *Dll* في العيينة يشرح اختلاف أنماط العُيينات.** حدث تطور عدد العُيينات (S' وS'') والتحكم بحجمها (S''') من خلال تغيير المفاتيح بطرق مختلفة (رسم ليان أولدز)

المحاكاة وتطوّر نمط اللون

يطغى تغيّر ألوان العوامل الأخرى في نمط الجناح على التاريخ التطوّري في أغلب الفراشات. فاختلاف المظهر بين الأنواع أو بين أفراد النوع الواحد يرجع إلى اختلاف الأنماط الفراغية لتصنيع الأصباغ الكيميائية والألوان البنيوية للحراشف. وبالرغم من أن كل نوع قصة بمفرده إلا أنني سأنهي هذا الفصل بالرجوع إلى تطوّر المحاكاة الذي لعب دوراً كبيراً في مناقشة فكرة الانتخاب الطبيعي، والذي يعتبر من منظور الإيفوديفو لغزاً يلزم حله.

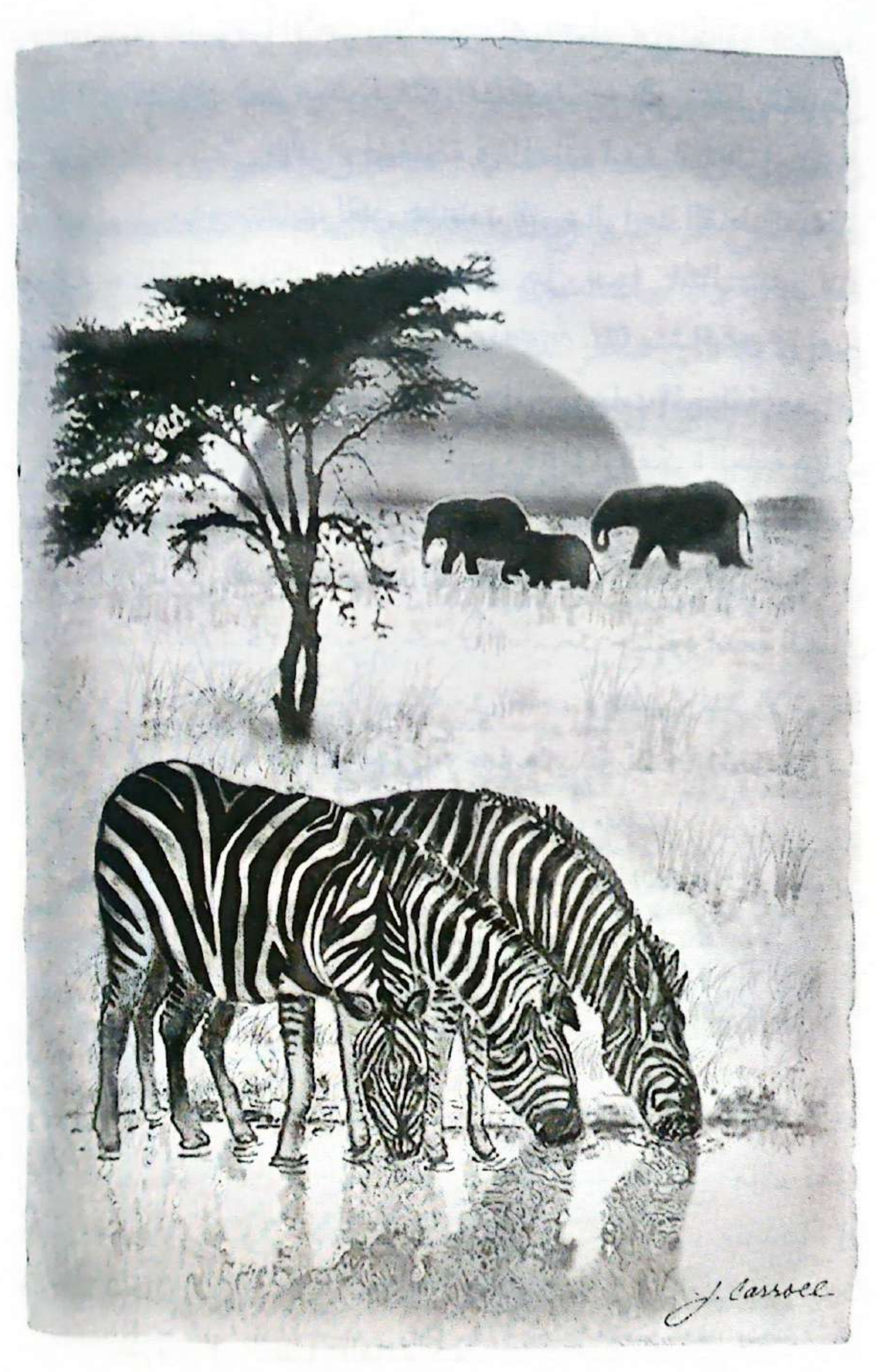
يمكن عادة تفسير الاختلافات المظهرية اللافتة للنظر بردها لأسباب جينية ونمائية بسيطة. على سبيل المثال لأنثى فراشة النمر الخطافية الذيل (*بابيليوس جلاوكوس Papilio glaucus*) التي تقطن شرقي أمريكا الشمالية (بما في ذلك وسكُنسن!) شكلان: أصفر بخطوط النمر السوداء، وأسود « (اللوحة 8 ي). النوع الأخير هو محاكاة دقيقة لفراشة الكرمة الأنبوبية الخطافية الذيل (*باتوس فيلينور Battus philenor*) التي تعيش في ذات النطاق الذي تتواجد فيه فراشة النمر الخطافية الذيل لكن فراشة الكرمة الأنبوبية الخطافية الذيل كريهة المذاق للطيور. اتضح أن الاختلاف المُميز بين الشكلين الأسود والأصفر لفراشة النمر الخطافية الذيل يرجع لفرق جيني وحيد يحدّد إن كانت الحراشف في المنطقة المركزية بالجناح تصنع صبغة سوداء أم صفراء. ورغم أن اختلافات النمط بين الأفراد تبدو معقّدة وتتضمن عناصرَ متعددة، إلاّ أن الاختلافات الجينية بين الشكلين تبدو قليلة نسبياً. ويبدو أن هذا الوضع ينطبق على حالات أخرى من المحاكاة.

تُظهر فراشات *هيليكونيس* القاطنة في أمريكا الوسطى والجنوبية

ألواناً تحذيرية، خصوصاً الأحمر والأصفر، التي تعلن عن مذاقها الكريه. تحدث المحاكاة بين مجموعات فراش *الهيليكونيس* التي تقطن مناطقَ جغرافية مختلفة. تلتقي الأنواع المختلفة في المنطقة الجغرافية الواحدة في امتلاكها نمط جناح متشابه، لكن جماعات النوع الواحد القاطنة مناطق جغرافية مختلفة قد تمتلك أنماطاً متغايرة. على سبيل المثال تبدو هـ. *ميلبومين* (*H. melpomene*) و هـ. *إيراتو* (*H. erato*) متشابهتين في جميع الأمكنة بالبرازيل والإكوادور وبيرو، لكن المجموعات المختلفة جغرافياً من ذات النوع تحمل علامات مختلفة (الصورة 8 ك). الفكرة العامة هنا أن الطيور التي تهاجم هذه الفراشات تختلف من منطقة لأخرى، ويتكيّف كل نوع من الفراش تحت ضغط هذا الانتخاب باتجاه شكل أكثر فعالية في إحباط هجوم المفترسين المحليين. تُحاول دراسات جينية واسعة النطاق التحقّق من الاختلافات الجينية المساهمة في حجم ومظهر ولون الأشرطة والخطوط على أجنحة *الهيليكونيس*. وعموماً يبدو أن عدداً بسيطاً من الاختلافات الجينية يتحكم بالفروقات بين المجموعات.

لم يحدّد علماء الأحياء حتى الآن بدقة الجينات الداخلة في تكوين المحاكاة وأنماط اللون في فراش *الهيليكونيس وخطافيات الذيل*. عندما تُحدد هذه الجينات ستبرز فرصة عظيمة للربط بين لياقة هذه الأنماط الرائعة وجيناتها وأشكالها.

بينما لم تحل حتى الآن ألغاز تطوّر أنماط الألوان الباهرة لأجنحة الفراشة، إلا أن علماء الأحياء قاموا باكتشافات عظيمة حول تطوّر لون واحد وهو اللون الأسود الأساسي في حيوانات متعدّدة. إن تطوّر الأشكال السوداء هو أحد أكثر تغيّرات الألوان انتشاراً في مملكة الحيوان. سأروي في الفصل القادم كيف أن دراسة التلوين الأسود قد مكّنت علماء الأحياء من رصد التطوّر «في أثناء العمل».



منظر أفريقي (جيمي كارول).

الفصل 9

لوِّنه بالأسود

محظوظون أولئك الذين تعلموا أن يروا في وحوش الطبيعة شيئاً يُحب، شيئاً يُتعجب منه، شيئاً يُبجل، لأنهم سيجدون نبعاً من اللذة والنضارة لا ينضب.

هيو بي كوت (Hugh B. Cott)
[التلوين التكيفي في الحيوانات] *Adaptive Colouration in Animals* (1940)

«بحق الله، ما الذي تفعله بنفسك أيها الحمار الوحشي؟ ألا تعلم أنك لو كنت في مرتفعات فيلت لرأيتك من مسافة عشرة أميال؟ أنت لا تجيد التخفّي».

قال الحمار الوحشي: «نعم، لكن هذه ليست مرتفعات فيلت. ألا ترى ذلك؟»

قال النمر: «أرى ذلك الآن، لكن لم أرَه طيلة أمس. كيف تفعلها؟»

قال الحمار الوحشي: «دعنا نذهب، وسنريك».

قام الحمار الوحشي والزرافة، وتوجه الأول إلى شجيرات الشوك الصغيرة حيث تشكّل أشعة الشمس الساقطة خطوطاً، بينما توجّهت الثانية إلى أشجار طويلة حيث تكوِّن الظلال الساقطة بقعاً على الأرض.

قال الحمار الوحشي والزرافة: «انظر الآن، هكذا نعملها. واحد، اثنان، ثلاثة! أين ذهب إفطارك؟»

حدَّق النمر والأثيوبي في كل مكان، لكن لم يريا في الغابة سوى ظلال على هيئة خطوط وبقع، ولم يريا أبداً أي أثر يدلّ على الحمار الوحشي والزرافة. لقد ابتعدا واختفيا في الغابة ذات الظلال.

قال الإثيوبي: «رائع، خدعة يجدر تعلمها. تَعلَّمْ الدرس أيها النمر».

رغم أن عالم القرَّاء قد فُتن بقصة «كيف حصل النمر على رقطته» (How the Leopard Got His Spots) لرديارد كِبلنج التي حكى فيها كيفية إخفاء الحُمُر الوحشية نفسها، إلا أنه من الواضح أن تيدي روزفلت (Teddy Roosevelt) لم يفتن، فبعد انتهاء فترته الرئاسية الثانية عام 1909 بوقت قصير، قام روزفلت برحلة قنص لمدة عام في البراري الإفريقية، وقد دوَّن عنها في كتاب [**دروب الصيد الإفريقية**] *African Game Trails* (1910)، وفيه هاجم الرؤى المعاصرة لتلوين الحيوانات قائلاً:

> أغلب ما يردّد عادة عن «التلوين الوقائي» لا أساس له أبداً... على سبيل المثال تعتبر الزرافات والنمور والحمر الوحشية أمثلة على حيوانات يوفّر لها تلوينها وقاية مفيدة. بيد أن الزرافة إحدى أكثر الأجسام بروزاً في الطبيعة... ويمكن الاطمئنان للقول إن تلوينها

لا يوفر سوى أهمية ضئيلة في «وقايتها» من مفترسين يعتمدون على أعينهم في الافتراس. ينطبق هذا على النمر، وهو دون أدنى شك أكثر استتاراً عن النمر الأسود، ولكن النمور السوداء ناجحة مثل أقرانها الرقطاء... ولا يمنح التلوينُ النمورَ أي ميزة، بل يشكل عيباً بسيطاً، لكن حياة هذه النمور تمر بظروف تجعل الميزة أو العيب المترتّب على التلوين بسيطاً لدرجة يمكن إهماله... هذا الحيوان ذو نشاط ليلي عادة، وفي الليل لا يكون للون التخفي أي شأن.

ولقد وجه روزفلت معظم سخريته للحمر الوحشية، فكتب:

ينطبق كل هذا بشكل خاص على الحمار الوحشي الذي كان بطريقة ما المثال الأبرز على موضة التلوين «الوقائي» في السنوات الماضية. في واقع الحال فإن تلوين الحمار الوحشي غير وقائي على الإطلاق، بل على العكس فهو بارز وفاضح إلى حدّ بعيد. وتحت الظروف الطبيعية فإنه قد لا يخفي الحمار الوحشي من مفترسيه طيلة حياته، أمّا الأمثلة النقيضة فإنها تعود لظروف استثنائية جداً يمكن تجاهلها.

ثم أضاف القناص العظيم كاتباً:

في الحقيقة لا توجد طريدة في تلك السهوب تخدمها ألوانها بأي طريقة في التملّص من خصومها ولا أحد يسعى للهرب من مرأى الخصوم... يرى المرء حيوان النوّ (wildebeest) من المسافات البعيدة بسهولة بالغة، ثم تسهل رؤية الحمار الوحشي والهَرتبيس (hartebeest)، وأخيراً الغزال».

ويعترض قائلاً:

«إن اعتقد امرؤٌ ما أن تلوين الحمار الوحشي «واقٍ» فليجر تجربة

ارتداء بذلة بنمط الحمار الوحشي، وسترتفع الغشاوة عن عينيه سريعاً».

لا أعتقد أنني سأنصح أحداً ما بارتداء بذلة الحمار الوحشي قرب حفلة قنص روزفلت. فلقد قنص هو وابنه كيرمت خلال تلك السنة 512 حيواناً، كان منها 29 حماراً وحشياً، أكثر من أي نوع آخر.

لكن عالم الحيوان هيو ب. كوت، الذي قضى في أفريقيا وقتاً أطول من روزفلت، لا يتفق مع الرئيس، فقد كتب عمله الموسوعي [**التلوين التكيّفي في الحيوانات** *Adaptive Colouration in Animals* (**1940**)] بناءً على بحث شامل. وكان كوت أيضًا فناناً موهوباً وفر له الحذق في تقنيات الرسم رؤية عميقة للكيفية التي تخفي وتفضح وتموّه بها أنماط اللون حيواناً ما. لم تكن مهارة كوت بأي حال ترفاً أكاديمياً. لقد نشر كتابه عشية اشتراك بريطانيا في الحرب العالمية الثانية، والتي خدم فيها كوت خبير تمويه (camoufleur)، مقدماً المشورة للجيش بشأن التصميم الأنسب لإخفاء وتمويه الجنود والعتاد الحربي.

شرح كوت أن الحمر الوحشية تستخدم مبدأ الأنماط المشوشة (disruptive patterns) لطمس كِفَاف جسمها (الشكل 9,1):

عند الغسق، حينما يكون عرضة للهجوم، في ريف يمنح غطاءً خفيفاً، يكون الحمار الوحشي أقل حيوانات الصيد وضوحاً. وصرح وايت (White)، الذي يزعم امتلاك خبرة عريضة مع هذه الحيوانات، أنه رأى «آلافاً وراء آلاف» من الحمر الوحشية في خلفيات مختلفة،

ثم أسهب: «في جميع الأحوال، يكون الحمار الوحشي بذلك الغطاء الخفيف الحيوان الأكثر قدرة على التخفّي من بين جميع الحيوانات، فخطوط الغطاء البيضاء والسوداء تشوّش جسمه إلى الدرجة التي تجعله غير مرئي تماماً إلى حد لا يكاد يصدق».



الشكل 1,9 **التلوين المشوّش في الحمر الوحشية**. الخطوط الرأسية تساعد في إخفاء كفاف الحيوان في خلفية متغايرة من الضوء والظلال (من كتاب هيو كوت [التلوين التكيفي في الحيوانات] *Adaptive Colouration In animals* (London: Methuen And Co.. 1940) ، استخدمت بإذن).

توجد تفسيرات أخرى لخطوط الحمر الوحشية إضافة لنظرية التخفّي. ففي القطيع، يصعب تمييز الفرد في خلفية من الخطوط المتحرّكة، ولربما وفّر ذلك ميزة إرباك المفترسين. النظرية الأخرى هي أن نمط الخطوط يمكن أن يقلل من لسعات الحشرات، حيث يعتقد البعض أنها تفضل الحيوانات الداكنة كلية. لكن هناك احتمال آخر في أن هذه الأنماط تساعد الأم في التعرّف إلى أطفالها أو الأفراد في إيجاد القطيع (يبدو أن الحمر الوحشية تنجذب نحو الخطوط السوداء والبيضاء المرسومة على الألواح).

توضح هذه الأفكار، والتضاد بين كوت وروزفلت أن للأسئلة الأحيائية حول غاية الأنماط إجابات غير حاسمة، فالحكايات تلهم نظريات لكنها لا توفر استنتاجات موثوقة. لقد اقتربتُ مرتين في كينيا من أشجار دون أن ألمح النمور المتمدّدة عليها. ولقد رأيتُ أيضًا نمراً ينحدر من الأشجار ويلاحق أيّل دكدك (dik-dik) متخفياً في شجيرات يغمرها ضوء النهار، عكس تأكيد روزفلت عن عادة النمور في الصيد الليلي. إن ميزات أو مضار امتلاك البقع أو فقدانها، أو كون الحيوان مخططاً أو خالصاً، أو أبيضَ أو أسودَ يمكن أن تُحدّد فقط من خلال بيانات مضبوطة يصعب الحصول عليها في أحوال كثيرة، كما قد تستنتج.

ومع ذلك، من الواضح أن تلوين الحيوانات يلعب دوراً محورياً في تعاملها مع أقرانها من ذات النوع أو من الأنواع الأخرى. ولذلك يحتل التاريخ الطبيعي للتلوين موقعاً مهماً في علم الأحياء التطورّية، خصوصاً بمثابة مثال على الانتخاب الطبيعي والانتخاب الجنسي. إلاَّ أن ما غاب عن تلك الأمثلة هو المعرفة الدقيقة بالأساس النمائي والجيني للصفات محل البحث. لكن بفضل علم الأحياء الجزيئية والإيفوديفو توجد الآن مجموعة من الأمثلة التي فُهمت فيها جيداً الآليات الكامنة وراء الاختلافات في النوع الواحد أو بين الأنواع، وفي بعض الحالات كان الفهم عميقاً لدرجة التحديد الدقيق لتغيّرات الدنا التي تقدّم الدليل الحاسم على التطوّر.

سأركز في هذا الفصل على تطوّر لون واحد فقط وهو اللون الأسود. يشكل تطوّر التلوين الداكن لأجزاء من الجسم أو أكمله أحد أكثر التغيّرات تكراراً في الطبيعة. سأسلط الضوء على كيفية تطوّر التلوين

الأسود في النمر الأمريكي والطيور والفئران الجيبية وذباب الفاكهة ومجموعة من الأنواع المستأنسة. إننا نعرف في بعض الحالات قوى الانتخاب الداخلة في تطوّر الصفة وأصلها الجزيئي. يجسرُ هذا الربط بين الشكل واللياقة وبعض الجينات فجوة خطيرة في النظرية التركيبية الحديثة. وعليه فيمكن اعتبار القصص الواردة في هذا الفصل «أيقونات» جديدة ومهمة للتطوّر تضاف إلى الأيقونات الكلاسيكية كعصافير جالاباجوس والعثّ المفلفل، باعتبارها أمثلة على العملية التطورية.

سأناقش كذلك كيف أن علم الإيفوديفو منحنا أفضلية تمكّننا من التصدّي لأسئلة استحالت الإجابة عنها من قبل. بعض هذه الأسئلة المثيرة هي: هل حدث وكرّر التطوّر نفسه؟ هل تكرّر ذات التغيّر الجيني في الأنواع المختلفة بشكل مستقل؟ أو هل يوجد أكثر من طريق لتكيف تطوّري متشابه؟

السفع في الطبيعة

يشير مصطلح السفع (melanism) إلى الحالة التي يظهر فيها الفرد أو النوع مناطق أوسع أو كميات أكبر من الأسود أو التلوين الأسود في مكان عوضاً عن ألوان أخرى. تتكون أصباغ (الميلانين) من بوليمرات كيميائية معقّدة وتحدث بأشكال عديدة ودرجات مختلفة، من اللون الأسود العادي، إلى البني، والبني المحمر، والبرتقالي، والأسمر.

إن السفع واسع الانتشار في أرجاء المملكة الحيوانية، وتمت دراستها في مجموعات حشرية (خصوصاً العثّ، والخنافس المنقطة)، وحلزونات اليابسة، والثدييات، والطيور. يمكن أن يخدم التلوين الميلاني عدة أدوار

منها الحماية من ضرر الأشعة فوق البنفسجية، والتنظيم الحراري (يوجد عادة في المناطق المرتفعة ويساعد على التدفئة السريعة للكائنات)، وكوسيلة للتمويه والتخفّي، ويؤثّر في اختيار الشريك الجنسي، وله وظائف أخرى. وبسبب المجموعة الواسعة من الاحتمالات يصعب عادة تحديد وظيفة النمط الميلانيني بدقة.

لاحظ مايكل ماجيرس (Michael Majerus) أن الأشكال الميلانينية شائعة في نحو نصف أنواع العثّ الموجودة بالمملكة المتحدة. وأبرز مثال معلوم عن ارتباط السفع بالانتخاب الطبيعي هو الانتشار التطوري للعثّ المفلفل (*Biston betularia*) في المناطق الصناعية في إنجلترا وشمال الولايات المتحدة خلال قرابة الـ 150 سنة الماضية. وللعثّ شكلان متمايزان: الشكل *النموذجي* وهو أبيض تتخلله بقع سوداء، والشكل *الكربوني* وهو تقريباً أسود بالكامل، وهناك أيضاً مجموعة من الأشكال الوسيطة (الشكل 9 ,2).

تقتل ملوّثات المناطق الصناعية أشنيات (lichens) الأشجار وتُسوِّدُ الجذوع، وكانت النتيجة أن أصبح الشكل النموذجي للعثّ المفلفل مكشوفاً في هذه المناطق فيما تخفّى الشكل الكربوني على الجذوع. وقادت مجموعة ملاحظات -جمعت حول تكرار الشكلين، ودراسة ميدانية لأماكن استراحاتها المفضلة، وضراوة الطيور المفترسة -إلى نتيجة عامة مفادها أن التغيّرات الحاصلة في تكرار الشكلين في وقت ما، وفي مناطق معينة، ناجمة عن اختلافات في الضغط الذي يمثله الانتخاب الطبيعي من قبل الطيور المفترسة. وبالرغم من توجيه بعض الانتقادات للمنهج المستخدم في بعض الدراسات المفردة التي تناولت السفع في المناطق



الشكل 2,9 **السفع (السواد) في العث المفلفل.** الشكل الفاتح واضح على الخلفية السوداء (فوق)، وخفي على الخلفية الداكنة (وسط). النمط الفاتح المرقش خفي على جذع شجرة مغطى بالأشنيات (تحت) (الصور تقدمة توني ليبرت (Tony Liebert) وبول بريكفيلد، جامعة لايدن).

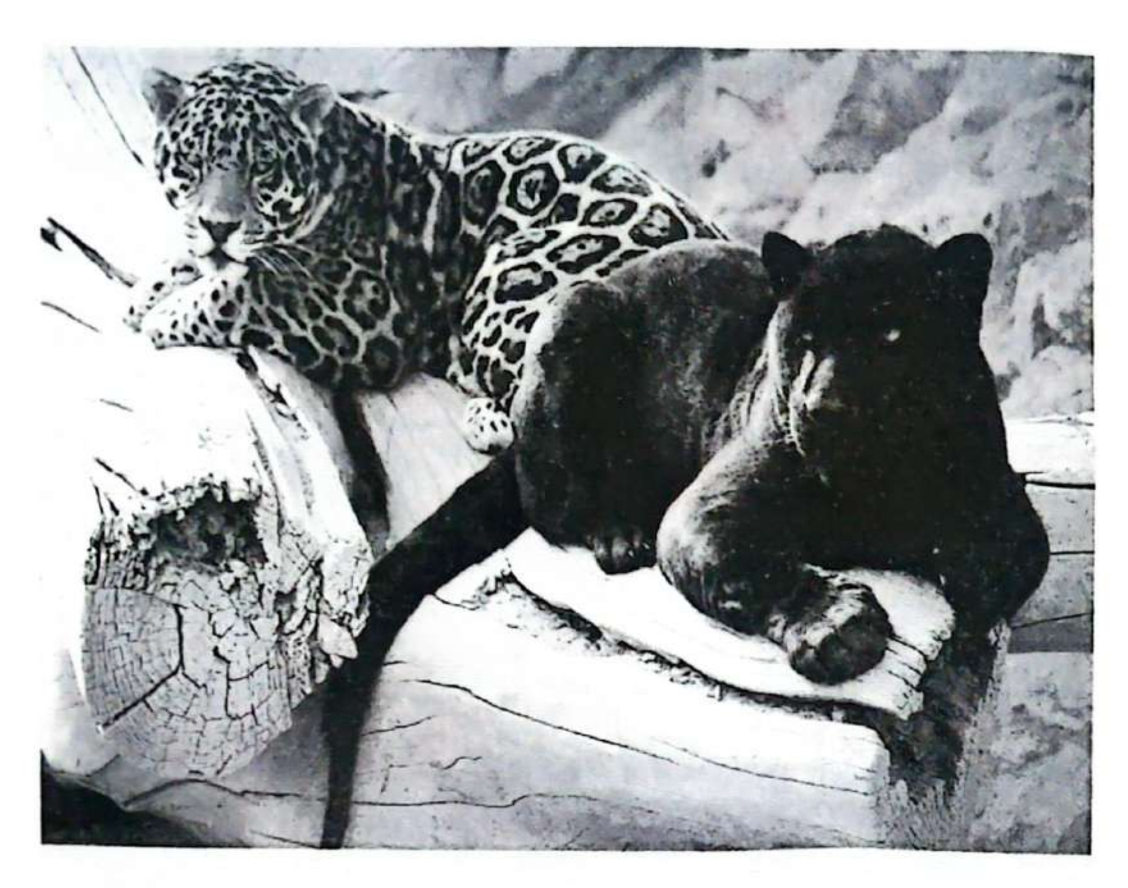
الصناعية في الماضي، إلا أن قصة العثّة المفلفلة تظل مثالاً كلاسيكياً على التطوّر الذي لوحظ وهو يحدث عياناً.

بدا أن الأساس الجيني للسفع في الشكل *الكربوني* بسيط إلى حدّ ما. تشير النتائج الناجمة من مزاوجة النمطين المختلفين إلى وجود جين رئيسي واحد يحدد أغلب الاختلاف في التصبيغ، وأيضًا وجود بعض الجينات التي تعدل درجة السفع. لكن لم يتم حتى الآن تحديد هوية الجين المؤثّر في ظاهرة السفع في المناطق الصناعية، وإلا لكان ذلك تتويجاً رائعاً لقصة يبلغ عمرها 150 سنة. ومن المفارقة أن تكون قوانين التلوث الأشد صرامة، وهي تطور إيجابي دون ريب، مقيدة لانتشار الشكل الكربوني ومنذرة باختفائه في العقود القليلة القادمة، ولذلك ينبغي لعلماء الجينات الجزيئية أن يتداركوا الأمر قبل فوات الأوان.

لقد تم تحديد الجينات المشاركة في السفع في بعض الأنواع الأخرى، وسأركز على هذه الأمثلة في المتبقي من هذا الفصل.

كيف يغطي النمر الأمريكي رقطته؟

إن الأشكال الميلانينية للسنّوريات الكبيرة مشهورة، ولعلك صادفت نمراً أسود في حديقة حيوان بمكان ما. تندر النمور السوداء في السافانا الإفريقية بدرجة كبيرة، لكنها الأكثر شيوعاً في أدغال جنوب شرق آسيا. ولعل للون الفراء الداكن ميزة في تفادي اكتشافها من قبل فريسة محتملة. نعلم من خلال عدد من التقارير أن النمر الأمريكي الأسود منتشر في مناطق كبيرة في وسط وجنوب أمريكا. وبينما يطلق على هذه السنّوريات لقب «السوداء»، إلاّ أن رقطتها مع ذلك جلية (الشكل 3,9)، إذ يبدو



الشكل 3,9 الطوران الأسود والبرتقالي لليغور (حقوق النشر لنانسي فانديرني (Nancy Vanderney) Efbc/Fcc، استخدمت بعد أخذ الإذن).

أن التلوين الأسود يُرَكَّب فوق النمط الأسود والبرتقالي لكنه لا يمحوه.

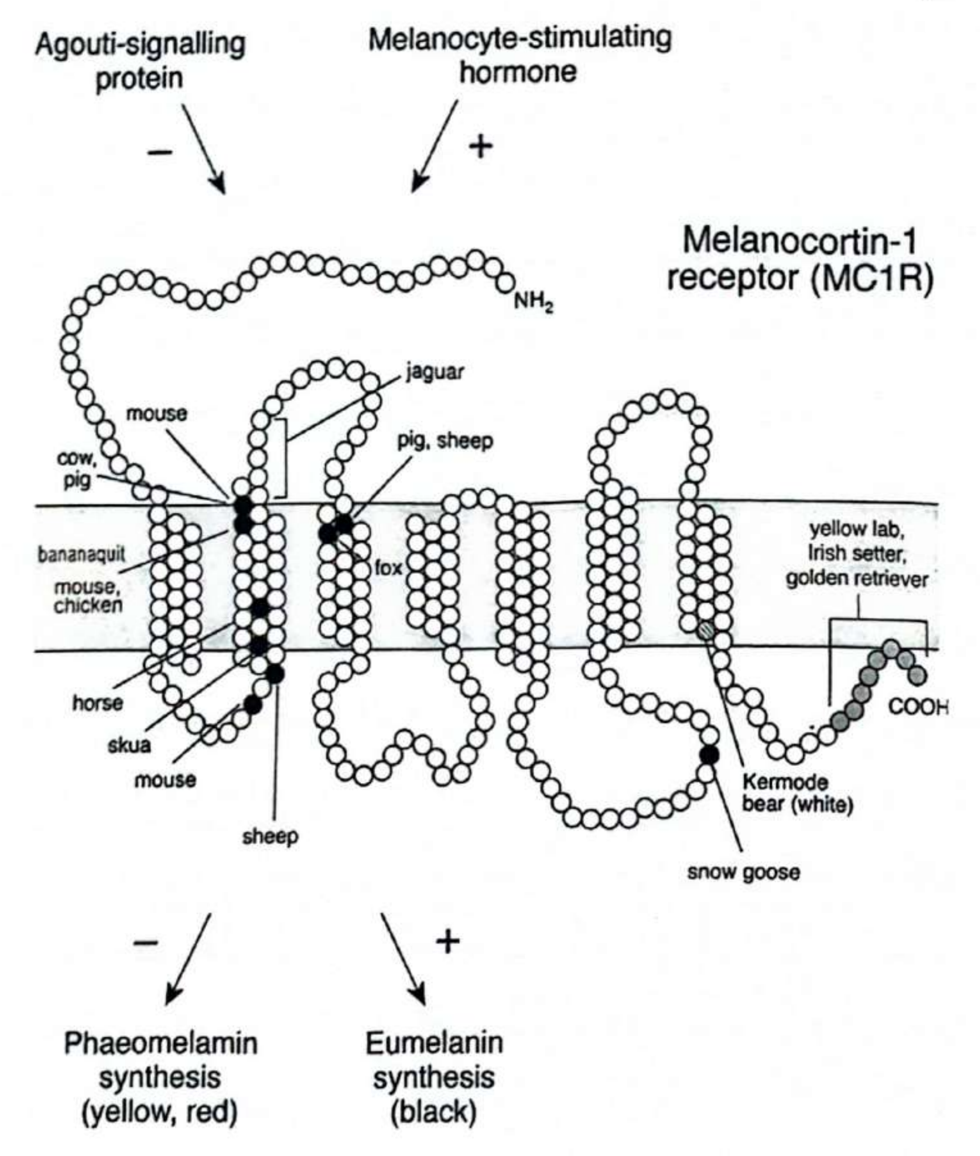
يوجد في الثدييات نوعان من الميلانين ينتج من قبل الخلايا الصبغية (pigment cells) في الجلد وبصيلات الشعر، وهما الميلانين الأسود (eumelanin) والميلانين الأحمر (phaeomelanin) المسؤولان عن تلوين الفراء باللونين البني المائل للأسود، والبرتقالي المحمر (أو الأصفر) على الترتيب. يتم التحكم بكمية كل صبغة مُنتجة من خلال بروتينات متعدّدة. يدعى أحد أهم هذه البروتينات مستقبل الميلانوكورتين-1 (melanocortin receptor-1) أو MC1R. يتموضع هذا البروتين على غشاء الخلية في الخلايا الصبغية، حيث يمتد جزء منه خارج الخلية والجزء الآخر إلى داخلها. يلتصق هرمون يسمى الهرمون المحفّز للخلايا

الميلانينية-ألفا (α-melanocyte stimulating hormone) ببروتين MC1R مطلقاً سلسة أحداث داخل الخلية الصبغية تؤدي إلى إنتاج الإنزيمات المصنعة للميلانين الأسود. وهناك بروتين آخر يسمى أجوتي (Agouti) يحصر المستقبل، وعندما يحدث ذلك يتم إنتاج الميلانين الأحمر. وبناء على ذلك، يعتمد نوع الصبغ على حالة نشاط البروتين MC1R (الشكل 4,9).

أظهر فحص الجين المشفر لبروتين MC1R في النمرين البرتقالي الاعتيادي والأسود وجود طفرة معينة في هذا الجين في كل أفراد النمر الأمريكي السوداء. تحذف هذه الطفرة 5 أحماض أمينية ويغيّر حمض أمينيٌ آخر في بروتين MC1R. يكون السنّور الذي لديه نسخة طافرة وأخرى سوية من جين MC1R أسود اللون، ولذلك يكون السفع سائداً. يعني ذلك أن تأثير الشكل الطافر من البروتين يسود حتى في ظل وجود الشكل الاعتيادي. إن التغير في بروتين MC1R جعله نشطاً باستمرار في تحفيز صناعة الميلانين الأسود، وحصَّنه من التأثر بالهرمونات أو الموانع المنظمة لهذه العملية.

إنها المرة الأولى في هذا الكتاب التي أصف فيها تغيّراً في سلسة بروتين (مقابل تغيّر في مفتاح جيني) يكون مسؤولاً عن الاختلاف في مظهر الحيوانات. إن السبب الذي يجعل MC1R قادراً على التغيّر هو أن هذا المستقبِل مكرس إلى حدّ كبير للتحكّم في صناعة الصبغة. فالتغيّرات الطارئة عليه لا تحدّ من وظائف الجسم الأخرى. ينتمي مستقبِل الميلانوكورتين-1 لعائلة تضم 5 مستقبِلات متخصصة في جوانب عديدة من فيزيولوجيا الثدييات، والتي تستجيب لعائلة قريبة من الهرمونات.

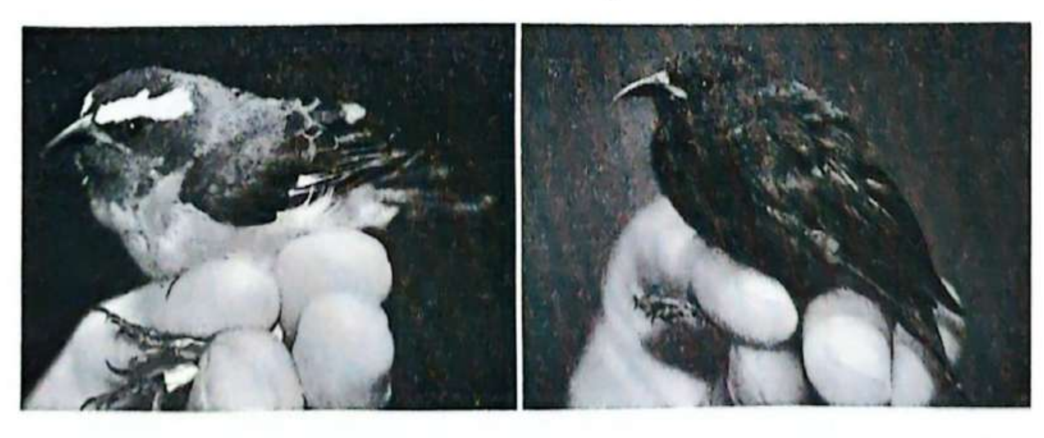
إن مقدرة التصبّغ على التطوّر دون التأثير في الوظائف الأخرى ناجمة عن تطوّر التحكّم في MC1R بحيث أنه ينشط في الخلايا الصبغية فقط، وناجم أيضًا عن بناء البروتين نفسه.



الشكل 4,9 **التغيرات في بروتين مستقبل الميلانوكورتين-1 مرتبطة بالسفع في الثدييات والطيور.** يمتد MC1R عبر غشاء الخلايا الميلانينية. يُحفز المستقبل عبر الهرمون المحفز للخلايا الميلانينية- ألفا لإنتاج الميلانين الأسود ويُكبح بواسطة البروتين أجوتي، وذلك يؤدي لتعزيز صناعة الميلانين الأحمر. تشير الدوائر الداكنة إلى مواضع البروتين المرتبطة بالسفع في أنواع مختلفة. ترتبط التغيرات في ذيل الجزيء بالتلوين الأبيض في دببة كيرمود، وأنواع مختلفة من ألوان فراء الكلاب (رسم ليان أولدز، بتصرّف نقلاً عن M. Majerus And N. Mundy. Trends in Genetics 19 (2003): 585، نشرت بإذن من إلسيفير)

تكون الطفرات في MC1R مسؤولة كذلك عن السفع في الأنواع الأخرى. ففي اليغورندي (jugaurundi)، وهو سنّور أصغر يقطن فيما بين الجنوب الغربي للولايات المتحدة إلى قارة أمريكا الجنوبية، يرتبط السفع أيضًا بتغيّر في بروتين MC1R، لكن هذا التغيّر يقع في موضع آخر في البروتين. وعليه ففي هذين السنّورين نشأت تغيّرات دراماتيكية في لون الفراء ناتجة عن تغيّرات في ذات البروتين.

لقد وجد أن طفرات MC1R تسبّب أيضًا سفع الريش في الطيور. على سبيل المثال تنتشر طيور بناناكويت (bananaquit) في منطقة الكاريبي على نحو واسع. ولأغلب طيور البناناكويت ريش أصفر فاتح على الصدر، وخط ريش أبيض على امتداد العين. توجد طيور بناناكويت في جزر سانت فنسنت وجرينادا يكسو أغلب ريشها اللون الأسود (الشكل 5,9)، يرتبط هذا السفع بتغيّر حمض أميني واحد في بروتين MC1R. ومن المثير للاهتمام أن ذات التغيّر في الحمض الأميني يحدث أيضًا في الدجاج والفئران المستأنسة. وعليه، فإن طفرات مستقلة في ذات البروتين، في السنّوريات والطيور، مسؤولة عن تغيّرات تطوّرية متشابهة، وبعض هذه التغيّرات قد حدثت أيضًا في السلالات المستأنسة. إذن للتطوّر المقدرة على تكرار نفسه سواء على مستوى جين معيّن أو حتى على مستوى حمض أميني واحد في بروتين ما.



الشكل 5,9 السفع في طيور بناناكويت. (الصورتان تقدمة أندرو ماكول Andrew Maccoll).

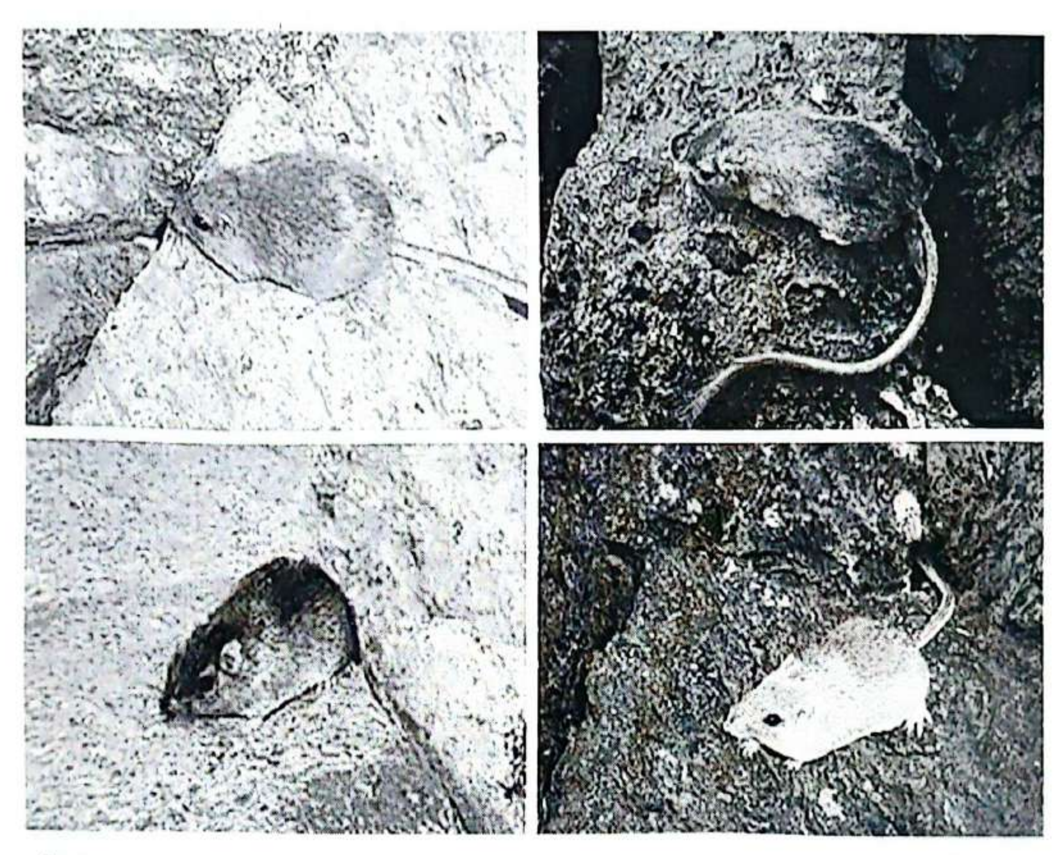
وبينما نعلم أن السفع في الحيوانات المستأنسة صفة تم انتخابها من قبل البشر، إلاَّ أننا لا نعلم الضغوطات الانتخابية المؤثرة في تكرار السفع في السنّوريات البرية أو طيور البناناكويت. بالنسبة للمفترسات فقد يساعدها التلوين الأسود في تفادي اكتشافها خلال الصيد، أما البناناكويت فقد يؤثر السفع في اختيارها للموطن المفضل بالارتفاعات المختلفة، غير أن هذه ليست سوى تخمينات. بالمقابل، تتضح الميزة أو العيب الانتخابي للسفع في أنواع أخرى، تقدم هذه الأنواع انعطافاً مفاجئاً في قصة MC1R وتطوّر السفع.

الفئران الجيبية المتوسطة:
أكثر من طريقة لتلوينها بالأسود

تتضمن صحارى الجنوب الغربي في الولايات المتحدة أنواعاً متعددة من المواطن المحلية التي تفرض متطلبات مختلفة على الحيوانات والنباتات القاطنة فيها. وعلى هذا النحو، فإن هذه المنطقة الواسعة توفّر مختبراً عظيماً لفهم التكيّفات التطوّرية.

في منطقة بيناكيت في الجنوب الغربي لأريزونا توجد مواطن صخرية داكنة ناتجة عن تدفّق الحمم البركانية منذ ما يقارب المليون سنة. ويقطن الفأر الجيبي المتوسط (*Chaetodipus intermedius*) هذه المنطقة إضافة لمناطق صخرية أخرى من الجنوب الغربي. ولقد لاحظ علماء الطبيعة في الثلاثينيات أن الفئران الموجودة في هذه الصخور البركانية عادة ما تكون داكنة اللون، بينما الأخريات الموجودة في المناطق المجاورة ذات التربة الرملية الفاتحة عادة ما تكون فاتحة اللون (الشكل 6,9). لقد

اعتُقِد أن الارتباط بين لون فراء هذه الفئران وموطنها المفضّل هو تكيّف ضد المفترسات، وخصوصاً البوم، التي رُصِدت مراراً أثناء تغذيها على هذه الفئران. وقد أظهرت التجارب أن البوم يمكن أن تميّز بين الفئران الداكنة والفاتحة حتى في الليل (تسمح السماء الصافية في الصحراء بانعكاس استثنائي لضوء القمر على الصخور والتربة). وأتى دعم آخر للفائدة التكيفيّة للون الفراء من مراقبة الأنماط المتشابهة لانتشار الفئران في مواقع عديدة.



الشكل 6,9 **الارتباط بين الموطن ولون الفراء في الفئران الجيبية المتوسّطة.** الفئران الفاتحة اللون عادة ما توجد على الصخور فاتحة اللون، وتوجد الفئران الداكنة على الصخور البركانية الداكنة، مما يمنحها حماية ضد المفترسين. (الصور تقدمة مايكل ناكمان، من تقرير م. ناكمان وزملائه في *وقائع الأكاديمية الوطنية للعلم*، أمريكا 100 (2003): 5268، استخدمت بعد الإذن

Nachman et al.. *Proceedings of Thenational Academy of Science*. USA 100: 5268 (2003)).

لفهم الأساس الجيني للسفع في هذه الفئران، فحص مايكل ناكمان وزملاؤه في جامعة أريزونا مؤخراً سلسلة جين MC1R في الفئران الداكنة والفاتحة. لقد وجدوا ارتباطاً كاملاً بين وجود أربع طفرات في جين MC1R في الفئران الداكنة أنتجت أربعة أحماض أمينية مختلفة في بروتين MC1R عن الفئران الفاتحة والفئران الأخرى. تشير هذه الاختلافات إلى وجود صيغة من MC1R تنشط باستمرار لإنتاج لون الفراء الأسود في مجموعة الفئران هذه، كما هو الحال في النمر الأمريكي، واليغورندي، وطيور البانكويت. يرسم البرهان الجيني، وتوزيع الفئران المختلفة اللون، والبرهان من الحقل، والبرهان الجزيئي، جميعها ترسم صورة مقنعة لحيوان قادر على التطوّر تحت تأثير الانتخاب في الظروف البيئية المحيطة.

إنها قصة مُرضية جداً، لكنها لا تنتهي عند هذا الحدّ. لقد فحص ناكمان وزملاؤه أيضًا فئراناً جيبية متوسطة، فاتحة وداكنة، من موقع آخر يبعد 475 ميلاً عن مجموعة أريزونا، تقطن هذه الفئران في منطقة صخور بركانية في نيومكسيكو وَحَوْلَها. وبينما كانت القصة البيئية متشابهة، إلا أن الأساس الجيني كان مختلفاً. لم تحمل الفئران الداكنة في نيومكسيكو طفرات في جين MC1R أو أية طفرات في الجين الآخر، *أجوتي*، الذي يسبِّبَ أيضاً تلويناً أسود عند تحوله (لأن *أجوتي* يثبّط نشاط المستقبِل MC1R، والطفرة في المثبّط يتيح فعالية كاملة لجين MC1R). يشير ذلك إلى وجود جينات أخرى، إلى جانب MC1R و*أجوتي*، يمكن أن تسبّب السفع إن حدثت لها طفرة. وعليه، فإن مجموعتين ميلانيتين (داكنتين) مختلفتين من ذات النوع تعيشان في مناطق متشابهة، على صخور بركانية

عمرها أقل من مليون سنة، قد وجدت طرقاً مختلفة لتطوّر السفع. إذاً لا يضطر التطوّر لسلوك ذات الطريق الجيني حتى وإن كان في ذات النوع.

النمور السوداء، والدببة البيضاء، وذوات الشعر الأحمر

كذلك هو الحال في النمور وبعض السنّوريات البرية الأخرى حيث تطوّر السفع عبر تحوّلات في جينات أخرى إلى جانب MC1R أو *أجوتي*. نعلم عبر دراسة أنواع عديدة أن لون الفراء يتأثر بجينات أخرى غير هذين الاثنين، وأيضًا بتراكيب معيّنة من الجينات الصبغية. على سبيل المثال، تنجم ألوان فراء كلاب لابرادور الصفراء، وكلاب الصيد الذهبية، والكلاب الساطرة الإيرلندية عن تحوّل يلغي فعالية MC1R الذي يحدّد، مع جينات أخرى، ألوان الفراء الأصفر، أو البرتقالي، أو الأحمر. ويعمل علماء البيولوجيا على تحديد هذه الجينات الأخرى الداخلة في السفع ولون الفراء، وهم متأكّدون من إيجاد تلك التغيّرات المسؤولة عن الاختلافات بين السلالات وبين الأنواع.

في حين ينجم السفع عادة عن طفرات تفعّل جين MC1R، إلّا أنّ طفرات أخرى في نفس المستقبِل مسؤولة عن أنماط ألوان بارزة ومتميزة. على سبيل المثال، اعتُقد يوماً أن الدب «الكيرمودي» (kermode) الأبيض (يعرف أيضًا باسم «الدب الشبح») القاطن في مناطق شمال غرب المحيط الهادي يمثل نوعاً مستقلاً، لكنه في حقيقة الأمر مجرّد لون مختلف للدب الأسود (الشكل 7,9). يحمل الدب الكيرمودي طفرة في



الشكل 7,9 دب كيرمودي ودب أسود (الصورة تقدمة تشارلي رسل Charlie Russell)

جين MC1R يقضي على وظيفته كمستقبِل. وبسبب تعطل MC1R فإن الصبغة السوداء لا تُصنع؛ فيغدو الدب أبيض اللون.

وأخيراً فإن الطفرات في جين MC1R مسؤولة في الإنسان عن لون الشعر الأحمر، وهي مسؤولة كذلك عن النمش، ولون الجلد الباهت، والحساسية للشمس عند هؤلاء الأشخاص. أما سمار الجلد فهو ناجم عن إنتاج الميلانين الأسود استجابة للأشعة فوق البنفسجية، ويُتحكم بإنتاج الميلانين الأسود من خلال تحفيز MC1R عن طريق الهرمون المحفّز للخلايا الميلانينية-ألفا. ويبدو أن تحولات MC1R المسببة للون الأحمر في الإنسان تقلل من مقدرة MC1R على الاستجابة للهرمون المحفّز للخلايا الميلانينية-ألفا.

تطوّر الأنماط المزخرفة في الثدييات: الخطوط والبقع

الأمثلة التي وصفتها أعلاه عن لون الفراء وريش الطيور تشمل عموماً نمط الفراء أو الريش بأكمله. لقد رأينا أن تطوّر الفراء الأسود، أو الأبيض، أو الأحمر، أو الأصفر الخالص يتضمن طفرات في جينات صبغية، غالباً ما كانت في جين MC1R. غير أن أنماط الفراء والريش البري عادة ما تتكوّن من لونين أو أكثر يتوزّعان في تنميط مكاني معين. يعني ذلك أن تنشيط جينات الصبغ يجب أن يختلف في مناطق الجسم المختلفة الألوان. ولكي تنشّط هذه الجينات بشكل انتقائي يجب أن توجد مفاتيح تتحكم بتنشيط جينات الصبغ وأنماط الألوان.

لا يزال فهمنا لهذه المفاتيح في الثدييات في بداياته. إن أحد أكثر أنماط لون الفراء شيوعاً في الثدييات هو اللون الأصفر الباهت، أو البني، أو اللون الداكن لظهر وجوانب الحيوان مع تلوين فاتح للجانب السفلي منه. وفي حقيقة الأمر، فإن هذا هو النسق اللوني لفأر المنازل. يلعب الجين *أجوتي* دوراً محورياً في تلوين الجوانب السفلية والعلوية من الحيوان بشكل مختلف، وهناك مفتاح جيني مسؤول عن تنشيط *أجوتي* في بصيلات الشعر في الجانب السفلي من الحيوان. ولأن البروتين أجوتي يثبّط نشاط MC1R فإنه يجعل لون الفراء فاتحاً.

في حين نعلم بعض التفاصيل عن كيفية تكوُّن أنماط الفراء ذي اللون الواحد أو اللونين، فإننا لا نعلم الكثير بشأن الأنماط المزخرفة مثل الخطوط في الحمار الوحشي؟ يتناول الراحل ستيفن جاي جود في أحد مقالاته المفضّلة لدي السؤال التالي: «هل الحمار الوحشي حيوان أبيض

بخطوط سوداء؟ أم أسود بخطوط بيضاء؟» أثار لغز التاريخ الطبيعي هذا العديدَ من التعقيبات على مرّ السنين، وترجح الكفة الآن لمصلحة الحكم بأنه حيوان أسود بخطوط بيضاء. ولكن قبل أن آخذكم تجاه أي موضوع آخر، ينبغي أن أركز على السؤال الآتي: «كيف يحصل الحمار الوحشي على خطوطه»؟

في الحقيقة، ومقارنة بكل ما حدّثتكم به سابقاً في هذا الكتاب، فإننا لا نعلم إجابة مباشرة. فحسب معرفتي لم يدرس أحد أجنّة الحمار الوحشي. لكن يمكننا أن نكتب سيناريو من خلال تجميع نتف معلومات متوفرة من الثدييات الأخرى، مثل معرفة كيفية نموّ الخلايا المصنّعة للميلانين في الأجنّة، وملاحظة طافرات لون الفراء في الفئران والخيول وثدييات أخرى، ومظهر الهجائن الناتجة عن مزاوجة الحمر الوحشية بالخيول، والتفاوت في نمط الخطوط ضمن نوع الحمار الوحشي الواحد وبين أنواعه الأخرى.

إن الدليل الأهم لمعرفة أصل الخطوط هو أصل الخلايا الصباغية المسماة بالخلايا الميلانينية (melanocytes) التي تلوّن هذه الخطوط. تنشأ هذه الخلايا من سلائف (precursors) توجد فيما يسمى بالعرف العصبي (neural crest) وهي منطقة محاذية للنخاع الشوكي. تسمى هذه السلائف بالأرومات الميلانينية (melanoblasts) التي تتدفّق من العرف العصبي وتهاجر على طول المسارات المتعامدة مع النخاع الشوكي. يبدو أن الخلايا المهاجرة تتبع بعض الإشارات التوجيهية خلال رحلتها. وبما أن هذه المسارات تبدأ من أعلى الظهر ثم تنتشر للأسفل، فإن مناطق البطن والصدر تكون آخر ما تصل إليه. ويتضح أن الطفرات المبطئة أو

المقللة لهجرة الأرومة الميلانينية تترك هذه المناطق بيضاء اللون، وهذا هو أساس اللون الأبيض في الخيول، والصدر الأبيض في الكلاب، والبطن الأبيض في القطط.

إذاً، في الحمر الوحشية تكون الخطوط السوداء القائمة على الفراء هي المناطق التي تهاجر إليها الخلايا الميلانينية. لكن المجهول هو إن كانت مناطق الخطوط البيضاء تفتقر إلى الخلايا الميلانينية (إما لعدم هجرتها لهذه المناطق، أو لموتها)، أو أنها تحتوي على الخلايا الميلانينية لكنها منعت من إنتاج الصبغة. تتطلب كل آلية من الآليتين السابقتين تحكّماً مختلفاً على المستوى الجزيئي في نمط الخطوط. فمثلاً في الحالة الأولى، حالة عدم الهجرة، فإننا نعلم بوجود العديد من الجزيئات التأشيرية الناشطة بنمط مخطط في الأنبوب العصبي والجسيدات في الفقاريات. إن توجيه أو إعاقة الأرومات الميلانينية بأي من هذه الجزيئات سينتج نمطاً مخططاً من الأرومة الميلانينية. أما في الحالة الثانية، حالة المنع، فإن تنشيط مثبّط إنتاج الميلانين بنمط مخطط في الجلد أو بصيلات الشعر سيؤدي لأنماط فراء مخططة. ولأن بطن الحمر الوحشية يكون أبيض عادة فإنني أفضّل التفسير بأن اللون الأبيض النقي للخطوط ناتج عن الغياب التام للخلايا الميلانينية وليس عن تثبيط إنتاج الميلانين. لكن حتى لو كان هذا التخمين صحيحاً، هناك طرق متعدّدة لغياب الخلايا الميلانينية؛ حيث أن التفاصيل الدقيقة لآليات النمو تبقى سؤالاً مفتوحاً للإجابة.

إذاً هل الحمار الوحشي حيوان أبيض يكسوه سواد أم أسود يكسوه بياض؟ هناك نبأ سار آخر سيساعدنا على الحسم: لقد أبلغ عن وجود

حمر وحشية نادرة محتوية رقطات بيضاء تظهر مكان الخطوط الاعتيادية. هذا ما سيتوقعه المرء إن كان اللون «الأساسي» لنمط الفراء هو الأسود الكامل. غير أنني لا أعتقد أن فكرة اللون «الأساسي» تنطبق بالضرورة على الحمار الوحشي. إضافة إلى ذلك، أعلنت مؤسسة الحياة الفطرية الكينية، في مارس 2004، عن ولادة جحش وحشي أبيض بالكامل. ومن منظور علم النمو، فإن الخطوط البيضاء والخطوط السوداء يتم «رسمها» سوية، لذلك أفضِّلُ القول إن الحمار الوحشي هو حيوان بخطوط سوداء وبيضاء على حد سواء.

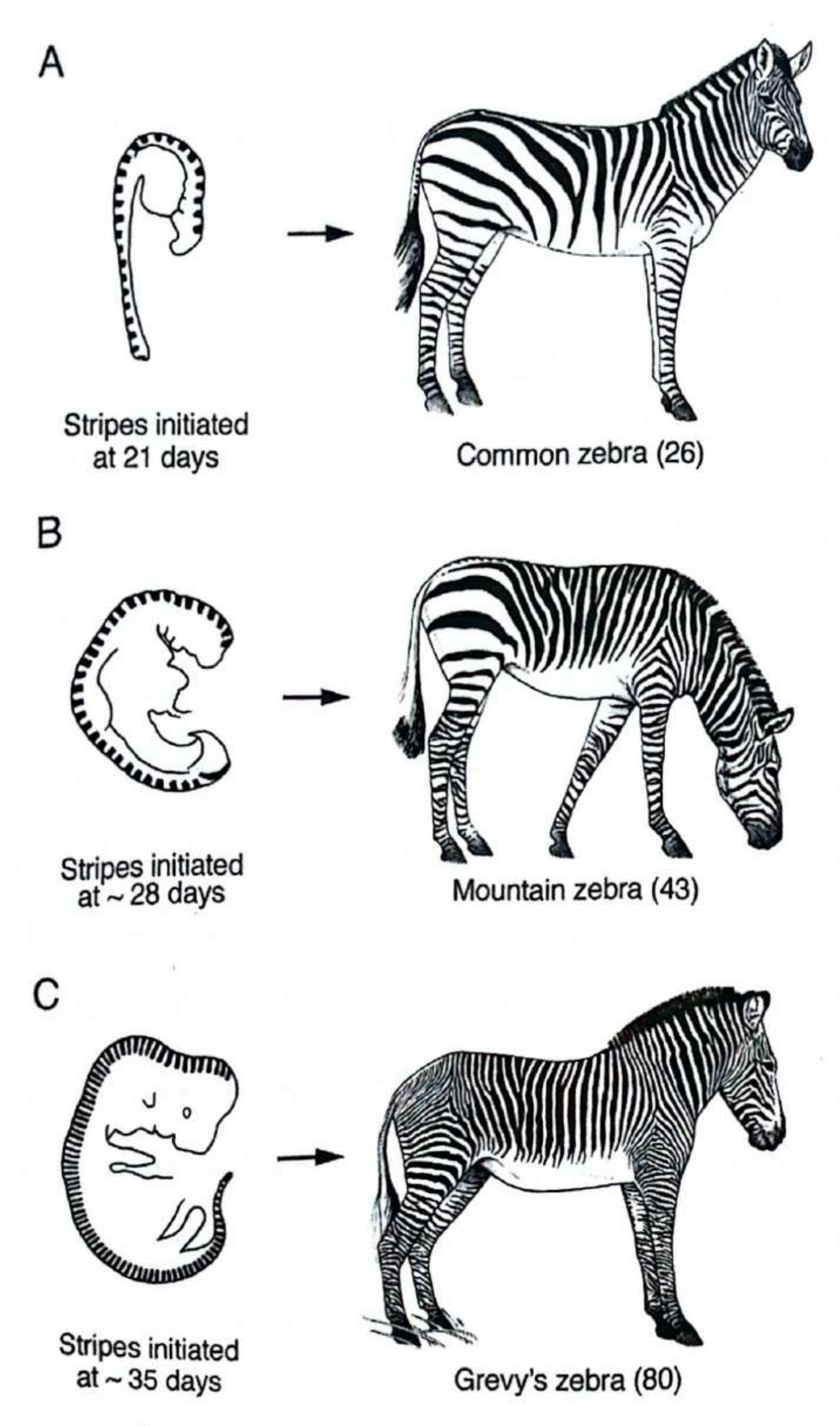
توحي هجرة الأرومات الميلانينية خارج العرف العصبي متعامدة مع الحبل الشوكي، في حقيقة الأمر، أن احتمال تكوِّن الخطوط هي ميزة متأصلة في عملية النموّ هذه. يمكن أن تؤدي الطفرات في الحيوانات الملوّنة عادة تلويناً خالصاً، مثل الفئران والخيول، لتكوِّن الخطوط بها. إضافة إلى ذلك، تمتلئ حكايات تربية الخيول والحمير بأمثلة عن حيوانات مخطّطة تخطيطاً جزئياً كنمط الخطوط الرمادية الداكنة[1]. ولقد كتب دارون ملاحظات واسعة في كتابه «أصل الأنواع» عن الخيول والحمير المخططة، وخصوصاً الهجينة منها. ويمكن الحصول على هجين خيل وحمار وحشي عبر مزاوجة فرس وفحل حمار وحشي منتجين ذرية مخططة عادة. لكن إن كانت الفرس بيضاء اللون فإن الخطوط السوداء تظهر فقط في المناطق الداكنة في الحيوان الهجين. يتماشى هذا مع تأثير جين اللون الأبيض في هجرة الأرومة الميلانينية بحيث تتكوَّن الخطوط حيث استقرت الأرومات الميلانينية فقط. ولعل المثير في الأمر هو

(1) توجد أيضاً في الكلاب والخنازير والماشية. المترجمان.

ملاحظة امتلاك هجين الخيل-الحمار الوحشي عادة لخطوط أكثر من والده الحمار الوحشي.

تنبّه جوناثان بارد (Jonathan Bard) للأمر المثير للفضول في اختلاف عدد الخطوط بين ثلاثة أنواع حيّة من الحمر الوحشية ليأتي بنموذج تفسيري جذاب جداً لجميع أنماط الحمار الوحشي. لاحظ بارد أن الحمار الوحشي الجريفي (Grevy zebra) يمتلك نحو 80 خطاً، بينما الحمار الوحشي الجبلي (mountain zebra) 43 خطاً، والحمار الوحشي الشائع ما بين 25 إلى 30 خطاً. اقترح بارد أنه يتم تحديد الأعداد المختلفة من الخطوط عبر اختلافات في التوقيت في أثناء النموّ الذي تبدأ فيه الخلايا الميلانينية رحلتها في كل نوع. ولاحظ بارد أن الخطوط كانت أعرض في الحمر الوحشية ذات الخطوط الأقل، بينما كانت أضيق في الحمر الوحشية ذات الخطوط الأكثر. واقترح أنه يمكن تفسير هذه العلاقة لو بدأ تكوين الخطوط على امتداد مسافات ثابتة بواسطة عمليات معينة في أجنّة الحمر الوحشية الفتية (طولها حوالي 0,4 ميليمتر) لكن في أوقات مختلفة بالأنواع المختلفة (الشكل 8,9). كلما بُكِّرَ في تكوين الخطوط، كبرت الخطوط وقلّ عددها في ذلك الحيوان. وبالعكس، كلما تأخر تكوين الخطوط، صغر حجمها مقارنة بحجم كامل الجنين، ولكن عددها يكون أكبر. علّل بارد أن سبب العدد الكبير للخطوط في هجين الحصان-الحمار الوحشي هو تأخير تكوّن الخطوط في الهجين مقارنة بالحمار الوحشي الوالد (فكرة معقولة جداً لأن الهجين ينمو عادة أبطأ قليلاً مقارنة بوالديه).

من العناصر المهمة في نموذج بارد بدء عملية تخطيط الحمار الوحشي



الشكل 8,9 نموذج جوناثان بارد لتكوين أعداد مختلفة من الخطوط في أنواع مختلفة من الحمر الوحشية. اقترح بارد أنه لو تكوّنت الخطوط على بعد فواصل متكررة (كل عشرين خلية خلال أوقات تختلف قليلاً باختلاف الأنواع (أ، ب، ج)، فإن الحمر الوحشية الشائعة، والجبلية، والجريفية ستمتلك خطوطاً ذات عدد وعرض مختلفين (رسم ليان أولدز، بتصرّف نقلاً عن ج. ب. بارد، دورية *علم الحيوان* J. B. Bard. *Journal of Zoology* 183: 527 (1977)).

عندما يكون الجنين صغيراً جداً، حوالي 6 أشهر قبل بدء اصطباغ الفراء، وهي مرحلة مهمة جداً في صناعة الأنماط لما سيصبح حيواناً كبيراً. تُشغَّل عمليات النموّ الصانعة للأنماط عبر مسافات قصيرة تمكن الخلايا من التواصل بعضها مع بعض، فالمسافات بين الخطوط في المواليد الحديثة والحمر الوحشية الأكبر كبيرة جداً بحيث لا تتمكن الخلايا في هذه الخطوط من مخاطبة الخلايا في الخطوط الأخرى. ولذلك فإن المخطط العام لأنماط الحيوان يُحدّد مبكّراً لتنمو الحيوانات أكبر فأكبر حاملة هذه الأنماط وفقاً لتصاميم غير مرئية.

إن كان السبب الحقيقي للاختلافات في عدد الخطوط هو التوقيت النسبي لعملية التخطيط في الأنواع المختلفة، فلا بّد أن تكون ناجمة إذاً عن تبديل التوقيت الذي تنشط فيه الجينات المسؤولة عن هجرة الأرومة الميلانينية. إن تبديل التوقيت هو تغيّر في التحكم أساساً، وعليه فلا بدّ أن تنجم الاختلافات في عدد الخطوط عن تغيّرات تطوّرية في المفاتيح الجينية المتحكمة في الأنماط الفراغية لهجرة الأرومة الميلانينية أو توقيتها.

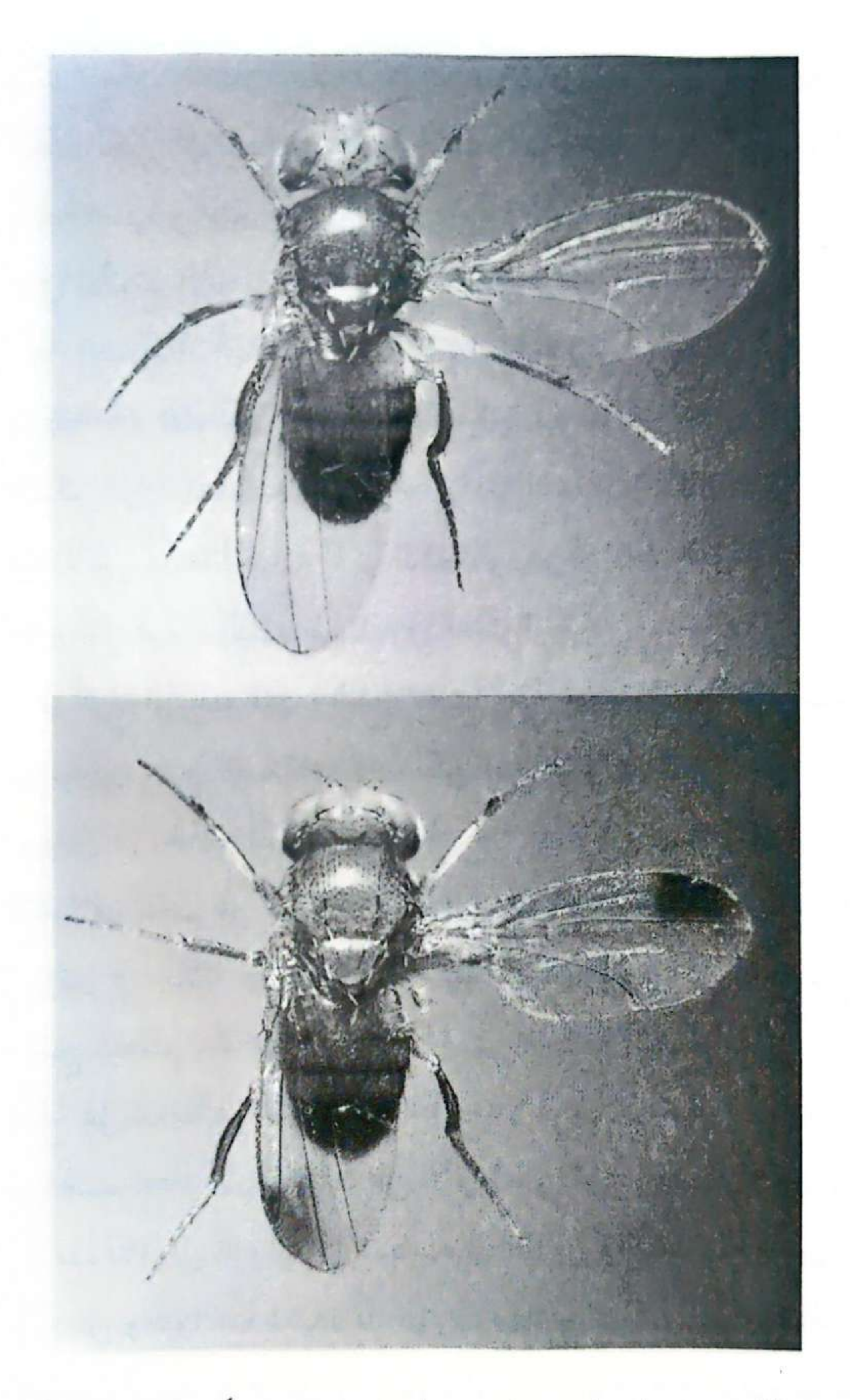
ماذا عن صناعة البقع؟ رغم رغبتي الشديدة في الكتابة عن كيفية حصول النمر على أنماطه، إلا أن البيانات التي نمتلكها عن البقع في الثدييات أقل مقارنة بأنماط الخطوط.

لكننا نعرف أكثر عن كيفية تكون الأنماط المعقدة للبقع والخطوط السوداء في الحشرات، وقد حظي هذا الموضوع باهتمام خاص في مختبري. على سبيل المثال تُظهر أجسام أنواع عديدة من ذباب الفاكهة تنوّعاً كبيراً في الأنماط السوداء المكوّنة من الميلانين. في دروسوفيلا

ميلانوغاستر (*Drosophila melanogaster*) يكون البطن والصدر منمّطاً، لكن تكون الهلب على الجسم داكنة جداً، وعادة ما تكون الأجنة صافية وباهتة.

في الأنواع الأخرى تنتشر كميات كبيرة من الصبغة السوداء في أرجاء الجسم، أو أنها تقيّد في أماكن معينة. مثلاً في نوع د. *بيارميفيس* (*D. biarmipes*)، تحمل أجنحة الذكر بقعة سوداء بارزة قرب الطرف (الشكل 9,9). تستخدم هذه البقعة في المغازلة حيث يختال الذكر راقصاً أمام الأنثى باسطاً أجنحته لترى البقعة، ويبدو أن ذلك يحقّق الغرض. أجل، لكل قوم أساليبهم المختلفة في العيش!

في أنواع الذباب عديمة البقع، تصنع جميع خلايا الجناح كمية قليلة من بروتين منتج لصبغة سوداء. لكن تنتج كميات ضخمة من هذا البروتين في الخلايا المكوِّنة لبقع الجناح في د. *بيارميفيس*. نعتقد أن الاختلاف ناجم عن تغيّرات تطوّرية في المفتاح المتحكم بتنشيط هذا البروتين في خلايا جناح ذبابة الفاكهة. إذ تمتلك جينات الاصطباغ مفاتيح تتحكم بنشاطها في أجزاء الجسم المختلفة. تسمح مقدرة كل مفتاح على أن ينشّط مستقلاً عن المفاتيح الأخرى بأن يطوّر جزء معيّن من الجسم نمطاً جديداً مختلفاً عن الأنماط على أجزاء الجسم الأخرى. وأتوقع، بناءً على ما رأينا في الذباب، أن الطيور والثدييات والأسماك والأفاعي وحيوانات عديدة قد طوّرت مفاتيح تتحكم أيضًا بجينات التلوين، وأن كل هذا التنوّع في أنماط لون الجسم في هذه المجموعات ناجم عن تغيرات تطورية في هذه المفاتيح.



الشكل 9,9 بقع الجناح في ذباب الفاكهة. تلعب هذه البقع دوراً في مرحلة المغازلة لدى الأنواع الحاملة لها. يؤدي تنشيط جينات الاصطباغ إلى اختلافات بين الأنواع. (تصوير نيكولاس جومبل Nicolas Gompel).

الانتخاب، والجينات، واللياقة:

ما هو مقدار الميزة المؤثر؟

لقد ذكرت في الفصلين الماضيين الحجج والبراهين على الانتخاب الطبيعي في أنماط العيُينات في الفراش، والسنّوريات الميلانينية، وفئران الجيب المتوسطة الفاتحة والداكنة، وأنماط الحمار الوحشي، إضافة للانتخاب الجنسي الناجم عن وجود البقع على أجنحة ذباب الفاكهة. ولربما اتضحت الكيفية التي تمنح بها أنماط الألوان المذكورة ميزة للأفراد الذين يحملونها. لكن ما هو القدر المطلوب من الميزة لكي تفضلها قوى الانتخاب؟ لم يستطع تيدي روزفلت، في عام 1910، رؤية الميزة التي وفرتها رقطة النمور وخطوط الحمر الوحشية لهؤلاء الأفراد. أعتقدُ أن روزفلت ظن، مثل كثير من الناس، أنه لا بدّ للميزة أن تكون جلية أو سهلة القياس كي تفضل قوى الانتخاب نمطاً على غيره. غير أن السؤال الأساسي يبقى: ما هو القدر المطلوب من الاختلاف ليحصل هذا التفضيل؟

الجواب يقع ضمن مجال علم جينات الجماعات (population genetics)، وهو فرع من علم الجينات يهتم بالتفاوت بين الأفراد، والأساس الجيني لهذا التفاوت، والتغيّرات في تكرار الأشكال والجينات على مدار التطوّر. الإجابة المختصرة عن السؤال: «ما هو القدر المطلوب من الاختلاف ليحصل هذا التفضيل؟» هي أن عمل الانتخاب الطبيعي يتطلب اختلافاً بسيطاً في النجاح النسبي بين شكلين، وقد لا يكون الاختلاف ملموساً أو مقيساً في الحقل عادة، لكنه كافٍ لتفضيل تطوّر شكل على آخر.

لقد أعدّ علماء جينات الجماعات بعض المعادلات التي تكشف العلاقات الأساسية بين ميزة (أو عيب) طفرة معيّنة ومصير تلك الطفرة في جماعة أو نوع ما. نستطيع أن نسأل، باستخدام هذه الصيغ، عن مقدار الأفضلية التي ينبغي أن يتحلى بها شكل ما ليسود في جماعة، وكم من الوقت سيستغرق ذلك؟

يجب أن تراعى عوامل ومفاهيم متعدّدة. فمثلاً ماذا نقصد حينما نقول «أفضل»؟ يطلق على هذا المفهوم مصطلح «اللياقة»، وبالنسبة للحيوانات فإنه يعني أمرين: قدرة الفرد على البقاء حيّاً (العمر) ومقدار خصوبته (عدد الذرية التي ينتجها). ولكي يؤثّر الانتخاب وتسود طفرة جديدة، يجب أن تمنح الطفرة ميزة نسبية للياقة. لنفترض على سبيل المثال أن أفراداً ذوي الطفرة جديدة (فلنقل إنها السفع في عثّة أو في فأر جيبي متوسط) تُنجب في المتوسط 101 من الذرية مقابل 100 فرد من ذرية المفتقرين إلى هذه الطفرة. يشكل هذا فرقاً في اللياقة النسبية مقداره 1 في المئة فقط. سنحوّل هذا الرقم، باستخدام معادلتنا، إلى معامل انتخاب (selection coefficient)، يسمّى «ا»، ومقداره 0,01.

هل يمكن أن يؤثّر ذلك الفرق البسيط؟ لو حوفظ على ميزة 1 في المئة، فلكَ أن تراهن أنه يؤثّر. تزداد الطفرة في جماعة ما وفقاً لمعدل يتوقّف على حجم الجماعة، ومقدار معامل الانتخاب. ويمكن تحديد عدد الأجيال (الزمن) الذي تحتاج إليه طفرة للانتشار في الجماعة بأكملها بواسطة المعادلة التالية:

الزمن= 2\أ لو(2ع) حيث ع هو عدد أفراد الجماعة، و لو هو اللوغارتم الطبيعي

في مثالنا هذا، إن كان ع=10,000، وهو عدد كبير ومعقول، وكانت أ=0,01، فسيتطلب الأمر 2\0,01 لو(2x10,000)=1980 جيلاً. بالنسبة لفأر أو عثّة فإن هذا يمثل 2000 سنة تقريباً. أمّا إن كان أ=0,001، يعادل هذا 0,1٪ من الميزة، فإن الطفرة ستثبت في الجماعة بعد حوالي 20,000 جيل. تظهر هذه الحسابات أن الطفرة، وإن كانت الميزة بسيطة جداً، سينتشر في وقت قصير جداً وفقاً للمدد الجيولوجية. لكن معاملات الانتخاب لا تكون صغيرة جداً على الدوام. فبالنسبة للعث الميلانيني في المناطق الصناعية بإنجلترا أو بالنسبة للحشرات المقاومة للمبيدات الحشرية، فإن الزيادة السريعة في تكرار أفرادها كانت محسوسة خلال سنين معدودة وليس آلاف السنين. قُدِّر أن معاملات الانتخاب تراوحت في هذه الحالات بين 0,2 و0,5، وهو رقم كبير جداً ويعكس ميزة انتخابية ضخمة.

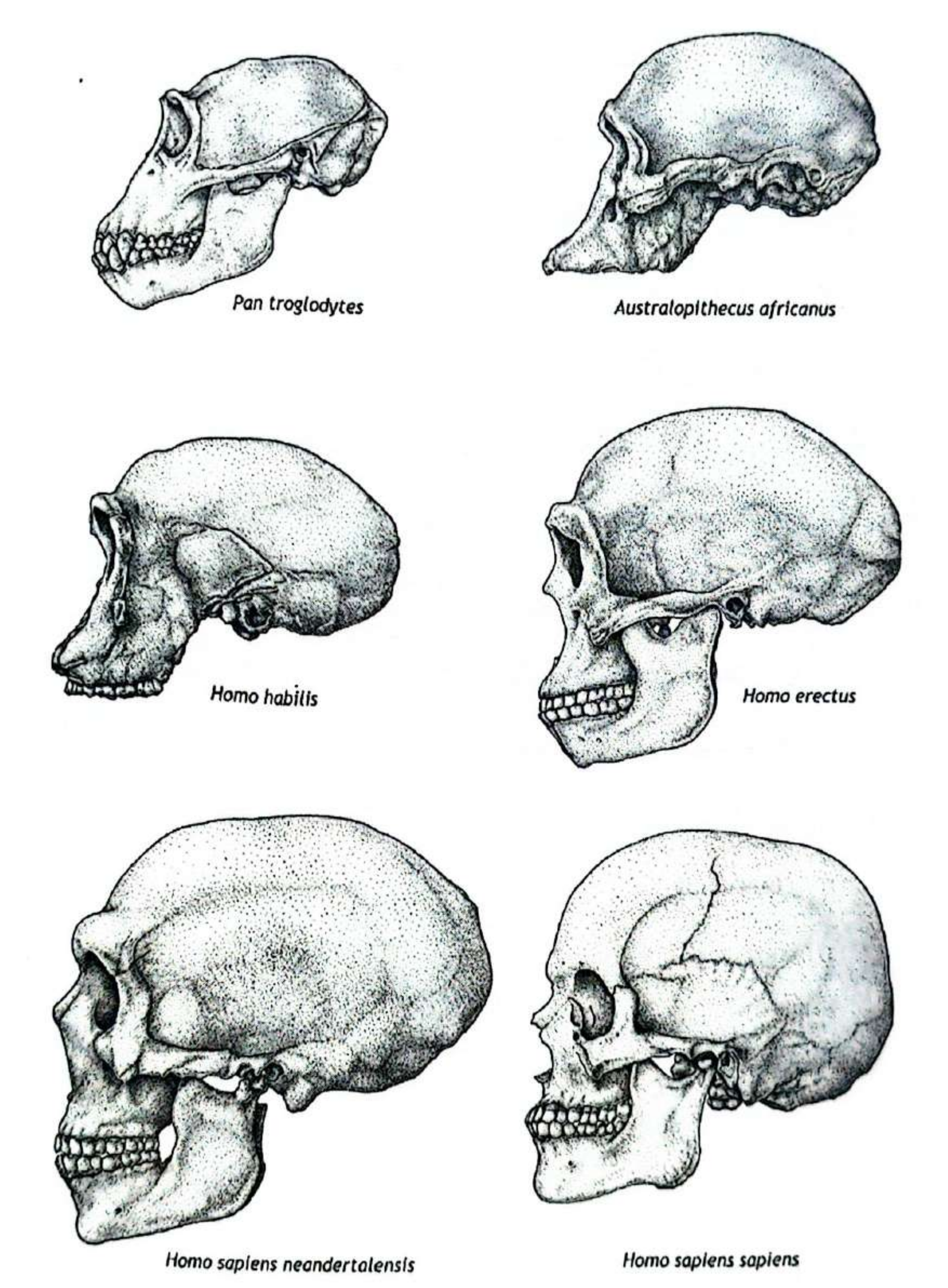
عندما نتأمل قوة الانتخاب يجب أن نأخذ في الاعتبار الأثر المعاكس لانتشار الطفرات التكيّفية وهو إزالة الطفرات الضارة. لن أدخل في تفاصيل الحسابات الرياضية، لكن يسعنا القول إن الطفرات المسبّبة لضرر بسيط لا تملك سوى فرصة ضئيلة جداً في الانتشار في كامل جماعة كبيرة. وحينما نتدارس منافع أو مضار الفراء الأسود أو الأبيض في الفأر الجيبي المتوسط، ينبغي أن نفكر أيضًا في الأنماط التي لا نراها في الطبيعة مثل الفأر الجيبي الأرقط. إن وُجدت هذه الطفرة فإنها ستجعل الفئران

بارزة سواء أكانت الخلفية فاتحة أم غامقة. لعلنا لم نرصد هذه الطفرة بسبب عدم حدوثها من الأساس، لكنني لا أعتقد أن ذلك هو السبب. الأمر الأكثر ترجيحاً هو أن تضرّر أفراد من طفرة ما لن يمكّنهم من العيش بأعداد كبيرة في الطبيعة.

لنغلق هذا الفصل بالرجوع للجدل حول الحمار الوحشي مستخدمين ذات المنطق الذي طبقتُه على فئران الجيب الرقطاء. إن أردنا الفصل في أهمية الخطوط ألن يكون مجدياً التساؤل عن سبب كون جميع الحمر الوحشية التي نراها مخطّطة؟ إن كانت عديمة الأهمية ألن نرى الكثير من الحمر الوحشية دون خطوط؟ بلى، لرأينا ذلك. إنّ طفرات تلوين الفراء شائعة بكثرة في الثدييات حتى أنَّ الطافرات الدراماتيكية (كالنمور البيضاء، أو الحمر الوحشية الرقطاء) تتكرّر بشكل ملاحظ في الطبيعة. وفي الحيوانات المستأنسة انتخب مربو السلالات عبر الزمن تشكيلات نادرة ظهرت تلقائياً مثل خيول ذات أنماط ألوان متعدّدة (الخيل قريب للحمار الوحشي). أُسلِّمُ أن مختبر السهول الأفريقية يخبرنا أن هناك أهمية للخطوط.

إننا نجهل فقط الغاية التي تخدمها. انتقِ النظرية التي تعجبك، لكن ضع في الاعتبار أمراً مهماً وهو أن ما يلزم لبقاء الخطوط هو وجود ميزة نسبية ضئيلة مقارنة بانعدام وجودها. إن مبادئ الانتخاب الطبيعي الأساسية (بما في ذلك الانتخاب الجنسي) في اكتساب أو إبقاء صفة ما تحكم تطوّر جميع الأنواع، ونحن من بينها. وكذلك هو الحال بالنسبة للدروس الأساسية المتعلمة من الإيفوديفو مثل المدولية، والمفاتيح

الجينية، وتطوّر الشكل. وأخيراً، سأتطرق لصناعة *الإنسان العاقل* (*Homo sapiens*) وصفاته المميّزة في الفصل القادم.



تطوّر حجم الجمجمة وأنماطها عند النسّانين الكبار (حقوق الرسم لديبورا ج. ميزلز (Deborah J. Maizels)، زوبوتانيكا (Zoobotanica))

الفصل 10

عقلٌ جميل:
صناعة
الإنسان العاقل[1]

إن الاختلاف في العقل بين الإنسان والحيوانات العليا، رغم عظمه، هو اختلاف في الدرجة لا في النوع.

-تشارلز دارون

The Descent of Man **(1871) [سلالة الإنسان]**

بعد وقت قصير من عودته من رحلته البحرية حول العالم، زار تشارلز دارون جيني (Jenny) وهي أول سعلاة[2] (orangutan) تُعرض في حديقة حيوان لندن، وكانت ضمن أوائل النسّانين التي عُرضت

(1) ترجمنا مصطلح «*Homo sapiens*» إلى *الإنسان العاقل*، واستخدمنا مفردتي إنسان وبشر ترادفياً للإشارة إليه. المترجمان

(2) أصل الكلمة من اللغة الملايوية وتعني حرفياً «إنسان الغاب» .المترجمان

في بريطانيا. تركتْ جيني تأثيراً عميقاً على عالِم الطبيعة دارون، فقد اندهش من تفاعلها مع القيّم عليها، وأُعجب كذَلك بمرحها وذكائها. وتبدّت مشاعرها كمشاعر طفل. ومنذ ذلك اللقاء الأول سينظر دارون للأطفال، ومن ضمنهم أطفاله، بعينيّ عالِم رئيسيات مقارن (comparative primatologist).

قد يكون الاقتراب من النسّانين مُشوِّشاً على الرغم من جاذبيته، فها هي الملكة فيكتوريا تكتب بعد رؤيتها سعلاة أخرى اسمها أيضًا جيني: «إنسان كريه مؤلم مخيف».

نرى في تعابير وجوه الشمبانزي والسعالي والغوريلات وفي سلوكها وحركات أياديها البارعة الجميلة انعكاسات أنفسنا. وقد ولّدت دوماً هذه الانعكاسات أسئلة استفزازية، مزعجة للبعض، حول الفجوة بين الإنسان والبهيمة. ما الذي يخطر بخلد النسّانين عندما ترى زائريها ثنائيي القدم عديمي الشعر؟ ما الكامن خلف تحديقة الغوريلا الطويلة؟ ما هي ضربة الحظ الجينية والبيئية التي وضعتنا خارج هذه الأقفاص محدقين داخلها وليس العكس؟

أعجبت ابنة أخي كيتي (Caitie) البالغة من العمر 14 سنة بمعرض النسّانين في تامبا بفلوريدا، وسألت أبيها: «تخبرنا دائماً أننا متطابقون مع الشمبانزي بنسبة 99٪. حسناً، ما الذي يجعلنا مختلفين؟»

سؤال ممتاز.

كانت كيتي تشير إلى الرقم المتداول بكثرة حول تطابقنا مع الشمبانزي على مستوى الدنا بنسبة 99٪. سوف أضع في هذا الفصل الإطار العام «لبداية» الإجابة عن سؤالها. لا بدّ من القول إنها «بداية» لسببين اثنين:

الأول هو أن علم الأحياء قد وصل لتوّه للمرحلة التي نستطيع فيها استعراض سؤال الاختلافات الجينية المحدّدة بيننا وبين النسّانين. فما ينتظرنا من الاكتشافات أكثر مما تحقّق. والثاني هو ندرة أنواع معيّنة من المعطيات بالنسبة لأجنّة الإنسان، مثل التمثيل البصري لأنماط النشاط الجيني، وهي معطيات علمتنا الكثير عن تطوّر الشكل الحيواني.

قال عالم النفس إريك فروم (Erich Fromm) ذات مرة: «إن الإنسان هو الحيوان الوحيد الذي يمثّل له وجوده مشكلة يجب عليه حلّها». يتضح أن هذا الحلّ يتطلّب صورة متكاملة تشمل مجالات عديدة من العلم بما في ذلك الحقول التقليدية، مثل علميْ الأحافير والتشريح العصبي المقارن اللذين حاولا لفترة طويلة فهم تاريخ الإنسان والأساس الأحيائي لقدراتنا العقلية، إضافة إلى الحقول الحديثة مثل علم الجينومات المقارن (comparative genomics)، وعلم الجينات البشرية الطبي (human medical genetics)، والإيفوديفو، وهي حقول تجتذب الكثير من الاهتمام مؤخراً.

إن التغيّرات في شكل الإنسان ووظيفته التي حصلت في الستة ملايين سنة الماضية منذ سلفنا المشترك الأخير الشمبانزي هي نتيجة تطوّر طريقة نموّ الإنسان وجيناته. وفهم كيفية تطوّر ملامحنا الرئيسية، مثل هيكلنا العظمي (ثنائية القدم (bipedalism)، وطول الأطراف، واليد والإبهام، والحوض، والجمجمة)، وتاريخ حياتنا (فترة الحمل، وفترة الطفولة المطوّلة، والتعمير (longevity))، وعلى وجه الخصوص دماغنا الكبير والكلام واللغة، يمثّل بعضاً من أعظم الأحاجي في علم الأحياء، وخصوصاً للإيفوديفو.

سأتفحص في هذا الفصل تطوّر شكل الإنسان من عدة زوايا، كالسجل الأحفوري وعلم الأحياء العصبية المقارن، وعلم الأجنّة، وعلم الجينات، وسأسبر أغوار أربعة أسئلة رئيسية في هذه الحقول:

1. كيف كان النمط التطوّري يحدث فعلاً في الأنواع التي قادت إلى ظهور الإنسان الحديث؟
2. هل كان تطوّر الإنسان نشازاً بأي شكل من الأشكال مقارنة ببقية الثدييات؟
3. في أي أجزاء دماغنا تكمن قدرات الإنسان؟
4. في أي أجزاء الدنا لدينا تكمن الاختلافات التي تميّزنا عن سائر القردة؟

إن الرسالة الرئيسية لهذا الفصل هي أن ما تعلمناه حتى الآن عن تطوّر الشكل في الحيوانات الأخرى مثل الفراش والحمر الوحشية وذباب الفاكهة وعصافير الشرشوريات (finches) والعناكب والأفاعي ينطبق تماماً على تطوّر شكل الإنسان. لا يختلف تطوّرنا الجسدي عما حدث في الأنواع الأخرى. فتطوّر ملامح الإنسان، بما في ذلك انتصاب القامة والدماغ الكبير والإبهام المقابلة لبقية الأصابع والكلام واللغة، ناجم عن تغيّرات في النموّ عدّلت بنى الرئيسيات أو النسّانين الكبار الموجودة وتراكمت هذه التعديلات عبر عدة ملايين من السنين وعبر عمليات تناوع عديدة. وبعض هذه الاختلافات الجينية بيننا وبين النسّانين الحيّة يتم اكتشافها هذه الأيام.

إيجاد الأسلاف

لفهم أصول الصفات الإنسانية على أي مستوى تلزمنا صورة دقيقة لتاريخنا وللسمات التي ميّزته. لا يمكننا بكل بساطة أن نأخذ صورة خاطفة للإنسان والشمبانزي والنسّانين الحيّة الأخرى ثم نستنتج كيف تُصنع الاختلافات بين هذه الأشكال. يمتلك كل من هذه الأنواع سلالة مستقلة ترجع إلى ستة ملايين سنة أو أكثر. ونعتمد كلية على الدليل الأحفوري للحصول على صورة لمقدار التغيّرات ومعدّلها وترتيبها في النوع الواحد أو بين الأنواع المختلفة. ومنذ زمن دارون حاولت أجيال من علماء الأحافير على الدوام إماطة اللثام عن تاريخ أصول الإنسان.

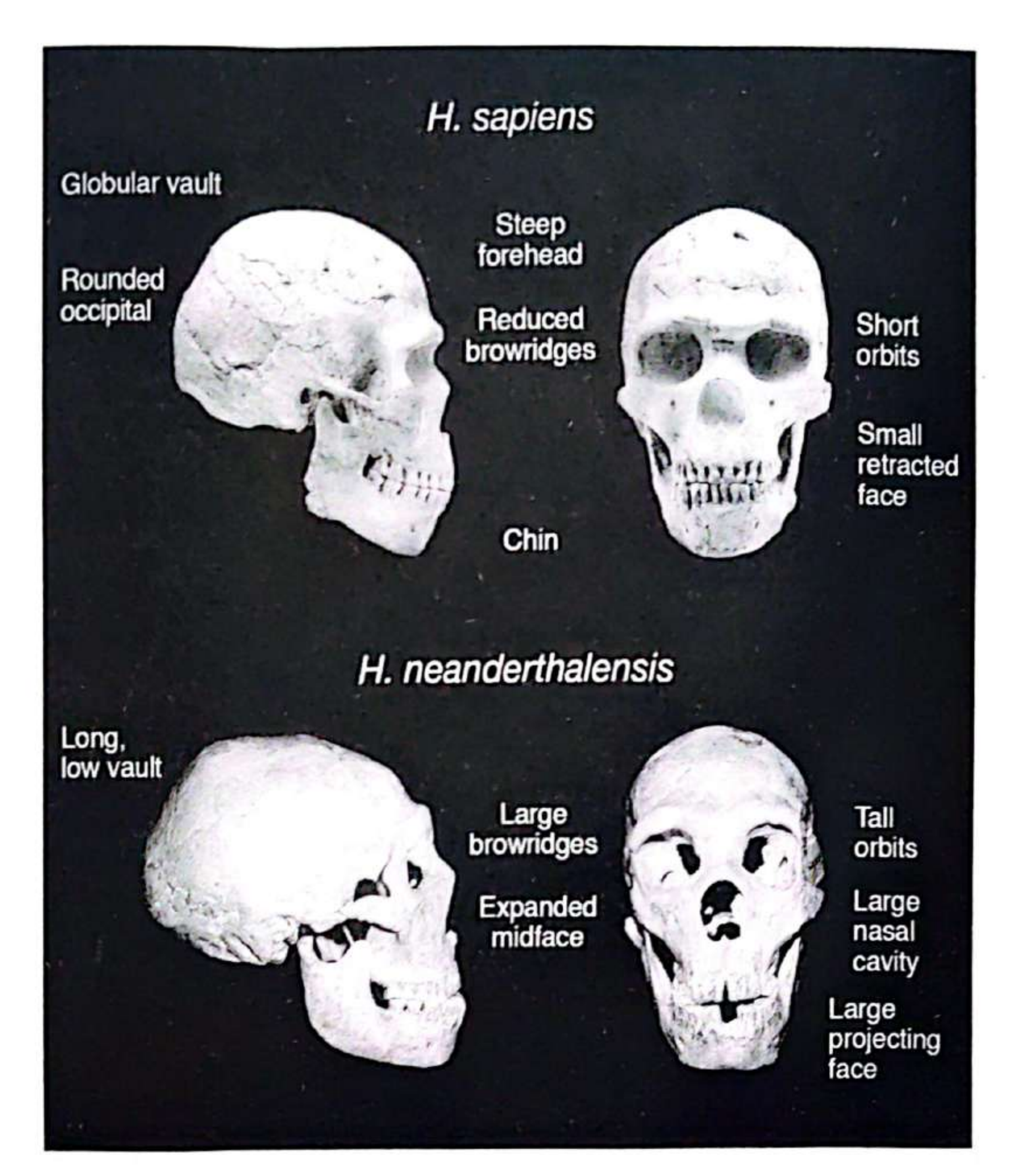
بدأ الكشف عن سجل تاريخ الإنسان السحيق عام 1856. بينما كان العمال يزيلون الوحل في كهف شكلته الأحجار الجيرية بوادي نياندر في ألمانيا، اكتشفوا جمجمة وبعض الضلوع وذراعاً وعظام كتف وجزءاً من الحوض. للوهلة الأولى اعتقد عاملٌ أن الهيكل العظمي لدب، لكن عظم الحاجب في الجمجمة وملامح أخرى أقنعت معلماً بمدرسة محلية أن هذه اللُقية قد تكون استثنائية، واستغرق الأمر بضع سنوات لفرز الواقع من ركام التخمينات العديدة.

استنتج عالم التشريح هيرمان شافهاوزن (Hermann Schaaffhausen) أن العظام تعود لفرد من عرق غابر من البرابرة الأوروبيين. وأعلن عالم أمراض ألماني بارز أن بنى العظام الغريبة هي مجرد نتيجة لمرض الكُساح (rickets). وقرّر عالم تشريح آخر أن عظام الرِّجل قد انحنت بسبب ركوب الخيل، وأن البقايا كانت لجندي قوزاقي أصيب بجرح قاتل في معركة ضد جيش نابليون وزحف إلى الكهف ليموت.

لم تُرض أياً من هذه التفسيرات توماس هكسلي نصير داروِن القوي الذي لم يستطع تصوّر أنه بإمكان رجل محتضر تسلق 70 قدماً ليموت داخل الكهف، ولا تصوّر طريقة وسبباً للموت تخفي أثر أدواته أو ملابسه. استنتج هكسلي أن لهذا الهيكل سمات غريبة وشبيهة بالنسّانين. إنه جزء من جنس الإنسان (*Homo*) لكنه مختلف. لقد حدّد الجيولوجي العظيم تشارلز ليل (Charles Lyell) عظام ماموث منقرض وكركدّن غامض وجدت على مقربة، وعليه فإن هذه الجمجمة «النياندرتالية» هي أثر عظيم الشأن (انظر الشكل 10 , 1 للمقارنة بين ملامح جمجمة الإنسان العاقل وإنسان نياندرتال (*H. neanderthalensis*).

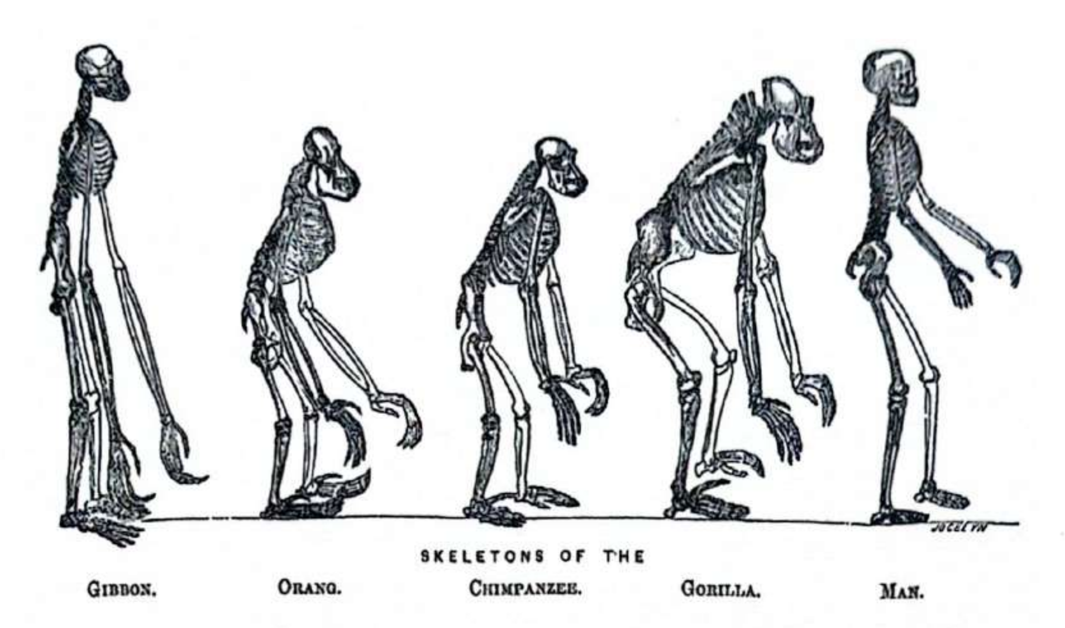
جاء الإقرار بكون هذه العظام أحافيرَ بشرية في حينه، فتقدير هذه الهياكل العظمية وشهرتها الواسعة جاءت على إثر الضجة المثارة ضد كتاب «أصل الأنواع» عام 1859. ورغم أن داروِن تجنّب الموضوع بحذر شديد في تحفته الرائعة باستثناء جملة واحدة: «سيُسلط الضوء على أصل الإنسان وتاريخه»، إلاّ أن موضوع تطوّر الإنسان كان دون ريب ما أثار أغلب الشغف في تلك الأيام ولا يزال.

أخذ هكسلي زمام المبادرة لمناقشة أصول الإنسان صراحةً، فكتابه المتألق [دليل حول موقع الإنسان في الطبيعة] *Evidence as to Man's Place in Nature* عام 1863 أوضح فيه قرابات الإنسان، وتصدّرت الكتاب صورة تعرض هياكل عظمية للقردة الكبار والإنسان (الشكل 10 , 2). لقد سخرت مجلة أثينيوم (*Athenaeum*) من هكسلي ومناصريه لكونهم ملوثّين لكرم محتد الإنسان وأنهم سيجعلون



الشكل 1,10 **مقارنة بين جمجمتي *الإنسان العاقل وإنسان نياندرتال*.** الاختلافات بين الجمجمتين موضحة في الصورة. (الصورة تقدمة د. دانيل ليبرمان (Daniel Lieberman)، قسم الأنثروبولوجيا بجامعة هارفرد)

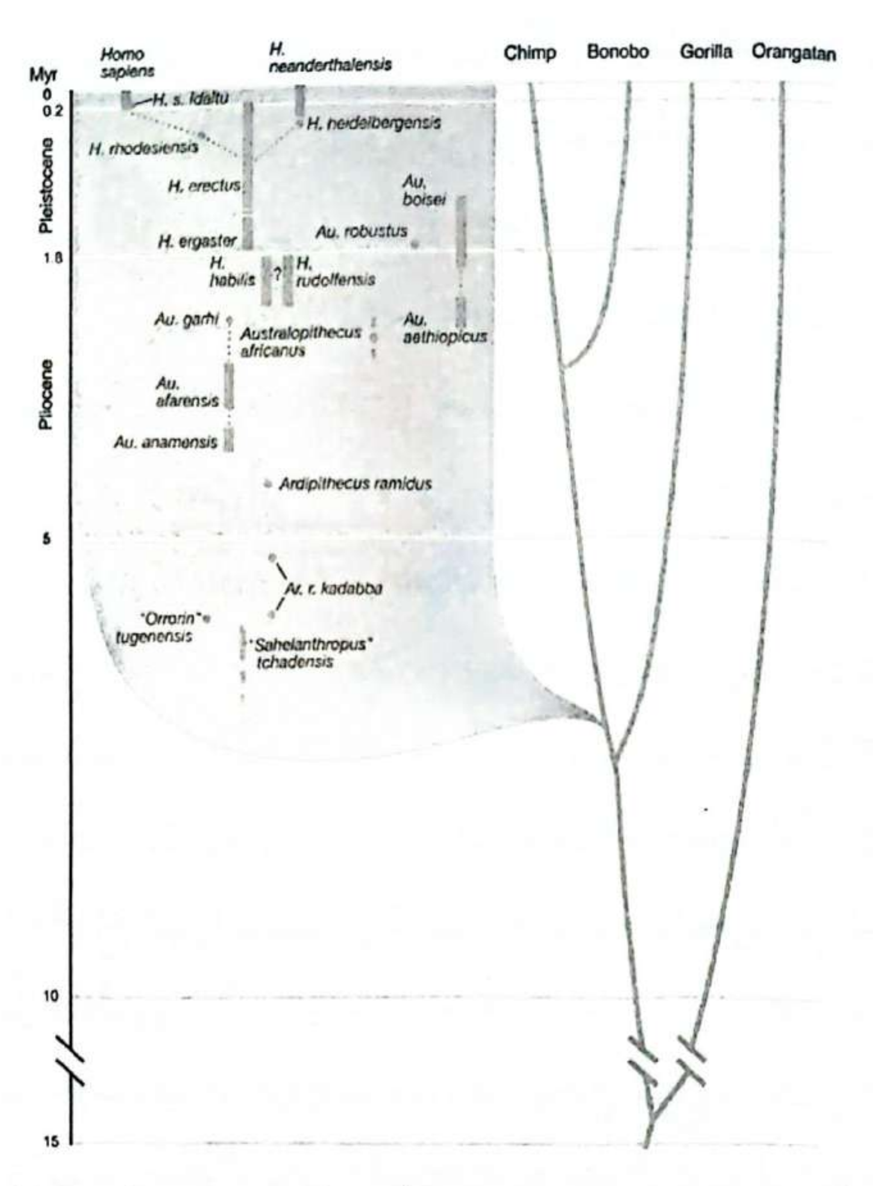
«عمر الإنسان مائة ألف سنة». ومن المفارقة أن هذا التخمين كان قريباً للصحة بنحو لافت، فأقدم أحافير *الإنسان العاقل* المعروفة للآن يرجع عمرها لحوالي 160 ألف سنة.



الشكل 2,10 **تطوّر أشكال الهياكل العظمية للنسّانين والإنسان** (من صدارة كتاب ت. هـ. هكسلي [دليل حول موقع الإنسان في الطبيعة]
Evidence as to Man's Place in Nature (1863)).

تطوّرت القصة كثيراً منذ ذلك العصر الذهبي الأول لعلم الأناسة الأحفورية (paleoanthropology). واستمر السجل الأحفوري في توسيع معرفتنا، وقد ظهرت بعض أكثر اكتشافاته إثارة في السنوات الأخيرة فقط. إن الأحافير المتنوّعة التي بحوزتنا تخبر عن ثلاث من أكثر القضايا أهمية في تطور النسّانين الكبار (مصطلح «نسّان» hominid) يشير لأنواع الإنسان والنسّانين الأفريقية، بينما يشير مصطلح «الأناسن» (hominini) إلى أنواع الإنسان وأسلافه منذ الانفصال عن النسّانين الكبار)[1]. أولاً، ما الذي يميزُ سلالة الأناسن عن النسّانين؟ ثانياً، ما الذي يميز الإنسان الحديث (*الإنسان العاقل*) عن الأناسن الأقدم؟ وثالثاً، ما هي طبيعة السلف المشترك الأخير بين الأناسن والشمبانزي؟

(1) قمنا بإعداد رسم توضيحي للتفريق بين هذه المصطلحات، ينظر الملحق رقم 2. المترجمان



الشكل 3,10 **الشجرة التطوّرية للنسّانين الكبار.** العلاقات بين مختلف سلالات أحافير الإنسان والنسّانين موضحة في الشكل. إن هذه الشجرة متحفّظة حيث إنها لا تتضمن جميع الأنواع المقترحة. المدة الزمنية لكل سلالة أحفورية مبيّنة بالأعمدة المظللة. لاحظ أن تاريخ *الإنسان العاقل* هو جزء صغير من حوالي 6 ملايين سنة من تطور الأناسن (رسم ليان أولدز، الشكر للدكتورين تيم وايت (Tim White) وبيرنارد وود (Bernard Wood) للمساهمة والنصيحة).

خلال العقدين الماضيين نما بشكل ملحوظ عدد أنواع الأناسن المعروفة وأيضًا عدد الأنواع المقترحة. استناداً إلى عناصر فهم عديدة لتحديد انتماءات الأحافير، مثل إن كانت بعض الأحافير تفاوتات في

ذات النوع أم أنها نوع زمني (chronospecies) -خط واحد تغيّر بمرور الوقت إلى شكل مختلف من الناحية المورفولوجية -فإننا نعرف ما بين 15 إلى 20 نوعاً من الأناسن التي ترجع إلى 6 إلى 7 ملايين سنة خلت. ويظهر الشكل 10 ,3 صورة متحفّظة لشجرة النسّانين الكبار (متحفّظة بمعنى أنها تستبعد أحافيرَ اقتُرحت لتمثيل أصنوفات إضافية، لا يوجد إجماع حول وضعها). إن أقدم أنواع الأناسن هو المكتشف مؤخراً واسمه *أُنسن الساحل التشادي* (*Sahelonthropus tchadensis*) الذي امتلك دماغاً بحجم دماغ الشمبانزي لكن ملامح أسنانه ووجهه شبيهةٌ بالأناسن. وبينما تغدو شجرة الأناسن التطوّرية أكثر اكتمالاً، وتمتد حتى النقطة التي نعتقد أن خطّي الشمبانزي والإنسان قد انفصلا عندها، تتجلّى إمكانية تفرّع عدة أنواع شبيهة بالنسّانين قرب قاعدة هذه الشجرة، من أحدها ظهر خطّ الأناسن.

أحافير الأجسام أو الجماجم معروفة لبعض أنواع الأناسن فقط، لذلك لا يمكننا دائماً القيام بالاستنتاجات التي نرغب فيها عن كل جوانب أجسامها التشريحية. لكن تتوفّر عيّنات كافية لمعرفة بعض النزعات في تطوّر ملامح الأناسن التي تميّزنا عن النسّانين الأخرى. إن سمات الشكل أو النمو ذات الأهمية الرئيسية في تطوّر الإنسان هي:

- حجم الدماغ النسبي
- طول الطرف النسبي
- شكل الجمجمة وحجمها
- شكل الصدر والجسم

- الإبهام المطوّل والأصابع المقصرّة
- الأنياب الصغيرة
- البنى الماضغة المقلَصة
- فترة الحمل الطويلة والعمر
- وضع الجمجمة المستقيم على العمود الفقري
- شعر الجسم المنحسر
- أبعاد الحوض
- وجود الذقن
- العمود الفقري ذو الشكل S
- طوبولوجيا الدماغ

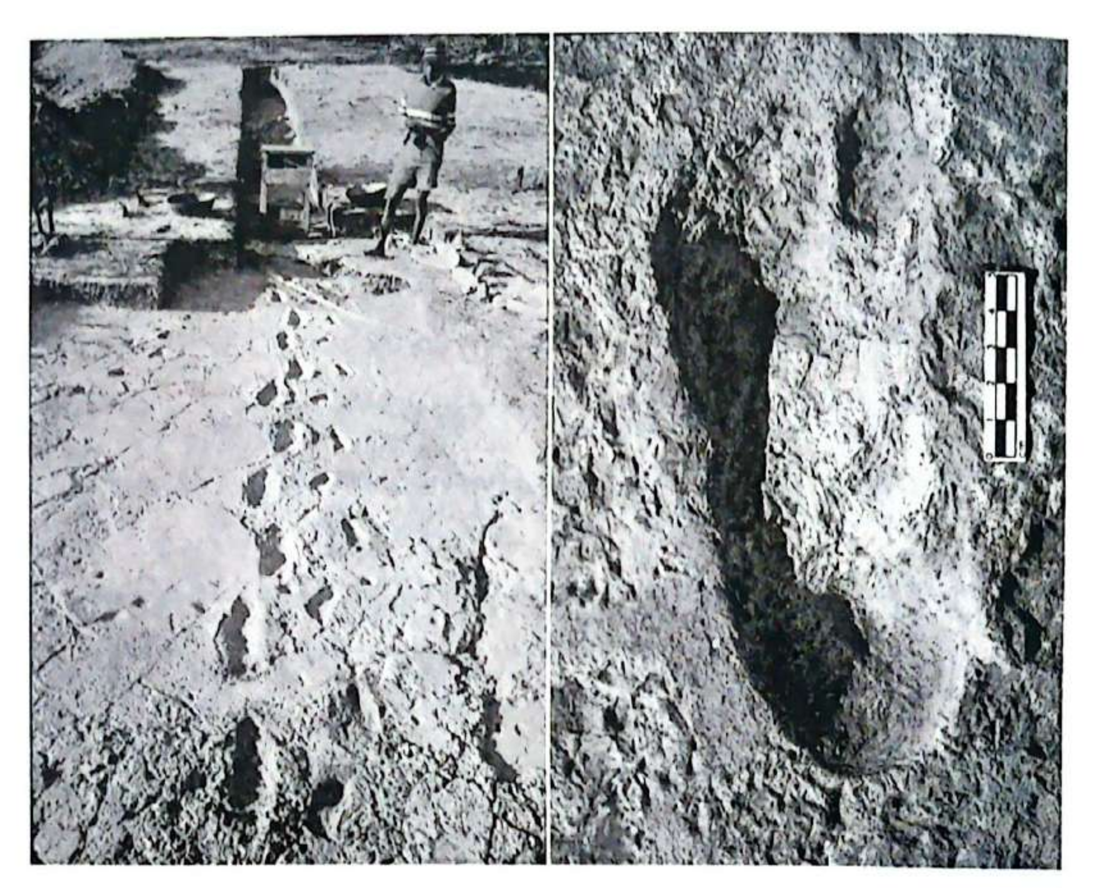
بالإضافة إلى ذلك، يعكس الدليل الأنثروبولوجي المرافق، كالأدوات، قدرات الأنواع المفردة وسلوكيّاتها كما تكشف عن الوضع التطوّري لبعض المهارات الإدراكية أو الحركية. وقد كان استخدام الأداة جلياً قبل 2,5 مليون سنة مع *الإنسان الماهر* (*Homo habilis*).

على العموم، امتازت أنواع الأناسن الأحدث مقارنة بالأنواع الأقدم بحجم جسم أكبر، ودماغ أكبر نسبياً، وأرجلٍ أكبر مقارنة بالجذع، وأسنان صغيرة. ما ينبغي وضعه في الاعتبار هو المقياس الزمني، ومقدار التغيّر في الخصائص، وعدد الأنواع التي حدثت فيها هذه التغيّرات. وبغض النظر عن النمط الدقيق لتفرّع شجرة الأناسن التطوّرية، كان التغير يحدث خلال مدة زمنية واسعة وفي أنواع عديدة. من الضروري إدراك أن نوعنا قد وجد في جزء صغير من المدة الزمنية الكلية لتطوّر

الأناسن (حوالي 3٪). فمعظم التطور الجسدي المثير للاهتمام قد سبق نشوء *الإنسان العاقل*.

إن بعض الصفات الجسدية الرئيسية التي تميّزنا ليست تغيّرات مفردة لكنها تتضمن تطوراً مزدوجاً للهيكل العظمي والجهاز العضلي. على سبيل المثال، تطلب تطوّر التنقل على قدمين تغيّرات في العمود الفقري والحوض والقدمين وأبعاد الأطراف، وتحرير اليدين لتطوّر مهارة أكبر. الشمبانزي أيضاً يستطيع المشي على قدمين عند الضرورة، لكن مشيته مختلفة تماماً، ولا يستطيع مد ركبته ليجعل رجله مستقيمة.

إن الدليل على ثنائية القدم في أنواع الأناسن المبكرة مشتقة من ملامح مورفولوجيا الهيكل العظمي. وأكثر الأدلة إدهاشاً اكتشف قرب موقع ليتولي (Laetoli) الأثري في تنزانيا عام 1976. كان عالم الأناسة الأحفورية أندرو هيل (Andrew Hill) يمارس بعض السلوكيات النمطية في الرئيسيات، بقذف رَوث فيلٍ على زميل، عندما عثر على مجموعات من آثار أقدام أناسن تتابعت حوالي ثمانين قدماً على طبقة رماد بركاني (الشكل 10 ,4). كانت آثار الأقدام المذهلة لفردين على الأقل، أحدهما كبير والآخر صغير، مشيا قبل حوالي 3,6 ملايين سنة في رماد سقط حديثاً. كانت هذه الآثار مغطاة حتى اكتشفها هيل ثم قام فريق ماري ليكي (Mary Leakey) الميداني بحفر ودراسة الموقع. إن الأنسن الوحيد المعروف في تلك الفترة في ذلك الموقع هو *أنسن الجنوب العفري* (*Australopithecus afarensis*) وهو نوع منتصب القامة ذو دماغ صغير، وقد اشتهر هذا النوع بادئ الأمر بسبب هيكل «لوسي» (Lucy) العظمي الذي اكتشف في أثيوبيا من قبل دونالد جوهانسون (Donald Johanson).



الشكل 4,10 **آثار أقدام غابرة لأناسن.** آثار الأقدام هذه موجودة في طبقة رماد غابرة، استنتج أنها تعود لفردين؛ بالغ وطفل من نوع *أنسن الجنوب العفري*، وقد اكتشفت في ليتولي في تنزانيا عام 1976. (الصورتان تقدمة بيتر جونز (Peter Jones) وتيم وايت (Tim White) من جامعة كاليفورنيا في بيركلي)

تطوّرت ثنائية القدم والملامح المصاحبة لها مبكراً في سلالتنا، إلاّ أن الدماغ الكبير لم يتطوّر. امتلكت أنواع أناسن الجنوب مثل أنسن الجنوب *العفري وأنسن الجنوب الأفريقي* (*Au. Africanus*) دماغاً بحجم حوالي 450–500 سم مكعب، ولم يكن هذا أكبر كثيراً من دماغ الشمبانزي (حوالي 400 سم مكعب). زاد حجم الجسم والدماغ بشكل كبير في جنس الإنسان (Homo) في المليوني سنة الماضية (الشكل 10 ,5)، لكنها لم تكن زيادة بسيطة ومنتظمة. بالأحرى يبدو أن الحجم الكلي للدماغ شهد زيادة كبيرة في بداية العصر البليستوسيني (Pleistocene)

(قبل 1,8 مليون سنة) وأيضًا في العصر البليستوسيني الأوسط (قبل 150–600 ألف سنة)، أي في فترتين تفصل بينهما مليون سنة من الركود النسبي.

Brain and Body Size Evolution in Homonins[a,b]

Species	Estimated age (MYA)	Body size (kg)	Brain size (cm3)
Homo sapiens	0–0.2	53	1355
H. neanderthalenis	0.03–0.3	76	1512
H. heidelbergensis	~0.3–0.4	62	1198
H. erectus	0.2–1.9	57	1016
H. ergaster	1.5–1.9	58	854
H. habilis	1.6–2.3	34	552
Paranthropus boisei	1.2–2.2	44	510
Au. africanus	2.6–3.0	36	457
Au. afarensis	3.0–3.6	NA	NA
Au. animensis	3.5–4.1	NA	NA
Ardipithecis ramidus kadabba	5.2–5.8	NA	NA
Sahelanthropus tchadensis	6–7[3]	NA	~320–380

[a] Not a complete list of all unrecognized or proposed species; some dates and relationships between species are unresolved.
[b] See Sources (page 307) for reference material.

الشكل 5,10 هناك نزعة منتشرة نحو زيادة حجم الدماغ والجسم منذ الأنواع الأقدم حتى الأحدث. لا تتوافر أحافير الجسم أو جماجم كاملة للأنواع المشار إليها بالحرفين غ م.

لماذا ازداد حجم أدمغتنا كثيراً خلال هذه الفترات؟ هناك نظريات عدة، سأذكر واحدة فقط وهي التكيّف مع التغير المناخي، لأنني أعتقد أنها تعكس رؤية عن دور القوى الخارجية في دفع خطى التطوّر، وهي رؤية غدت مقبولة بشكل واسع. قبل حوالي 2,3 مليون سنة تغيّر مناخ الكوكب ليكون أبرد وأجفّ، أدى هذا لتقلص غابات إفريقيا وحلّت عوضاً عنها السافانا الجافة. وبينما بقي النسّانون الكبار في مواطن الغابات المطيرة ذات الاستقرار الأكبر، تكيّفت أنواع الأناسن على مواطن أكثر تغيّراً. بعد فترة من الاستقرار النسبي صار مناخ الأرض خلال الـ 700 ألف سنة الماضية أكثر برودة، في المتوسط، من أي فترة أخرى منذ انقراض الديناصورات قبل 65 مليون سنة. وحدثت تقلّبات مفاجئة في درجة الحرارة عدة مرات مصحوبة ببعض التغيّرات الرئيسية خلال سنوات قليلة. ولعل المناخ المتغيّر وتأثيره على توفر الغذاء والماء والصيد والهجرة انتخب الأناسن التي تكيّفت أكثر في مثل هذه الظروف المتقلّبة. في ظلّ المناخ المتغيّر، تضاعف تقريباً حجم الدماغ خلال مليون سنة، وهي مدة تضمّ نحو 50 ألف جيل من الأناسن. إن هذا التغيّر مثير للإعجاب، لكنه ليس تغيراً لحظياً البتة.

من طريف القول إن حجم الدماغ والجسم كانا أكبر في إنسان نياندرتال منها في الإنسان الحديث. لا نمتلك أية دلالة جسمية واضحة حول سبب نجاحنا بينما انقرض أبناء عمومتنا قبل حوالي 30 ألف سنة دون ترك أي خلف. انفصل خطنا عن خط إنسان نياندرتال قبل حوالي 500 ألف سنة، وذلك قبل نشوء *الإنسان العاقل*. لم يساهم *إنسان*

نياندرتال في تجميعة جينات[1] *الإنسان العاقل*[2]. وظهر ذلك بشكل مقنع في دراسة بارزة كانت أحد أهم مساهمات علم الجينات في علم الأناسة الأحفورية حينما نجح سفانته بيابو (Svante Paabo) وزملاؤه عندما كانوا في جامعة ميونيخ في قراءة متوالية دنا مستخلصة من عينة عظم نياندرتال، وأثبتت هذه السلسلة أن النياندرتال غصن ميت في شجرة الإنسان التطوّرية.

تعاصر *الإنسان العاقل* وإنسان نياندرتال: اكتُشِفتْ مواقع متعدّدة تبيّن وجود النوعين في ذات الوقت. كلا النوعين استخدما الأدوات، وأشعلا النار، وامتلكا اللغة والوعي بالذات وعلامات ثقافية أخرى، غير أن نوعاً واحداً فقط ساد. ومهما كانت الميزة الذهنية التي ربما تفوّق بها الإنسان الحديث على النياندرتال وهو يستولي على مواطن سكناه فستكون على الأرجح ميزة كامنة في تشريحه العصبي وسيكون من الصعب التحقّق منها. لكن الصورة الكبيرة لنموّ دماغ الأناسن وتطوّره، مقارنة بالنسّانين الكبار، تبدو أكثر قابلية للدراسة والبحث.

صناعة عقل جميل

إن الزيادة الملحوظة في حجم دماغ الأناسن الأحدث هي مجرد مقياس أولي على الزيادة الممكنة في القدرات الإدراكية. فالحجم الكلي

(1) تجميعة الجينات (gene pool) هي إجمالي الجينات في مجموعة ما. يمكن أن يشير المصطلح أيضًا لإجمالي النسخ المتفاوتة من جين معين في مجموعة ما. المترجمان

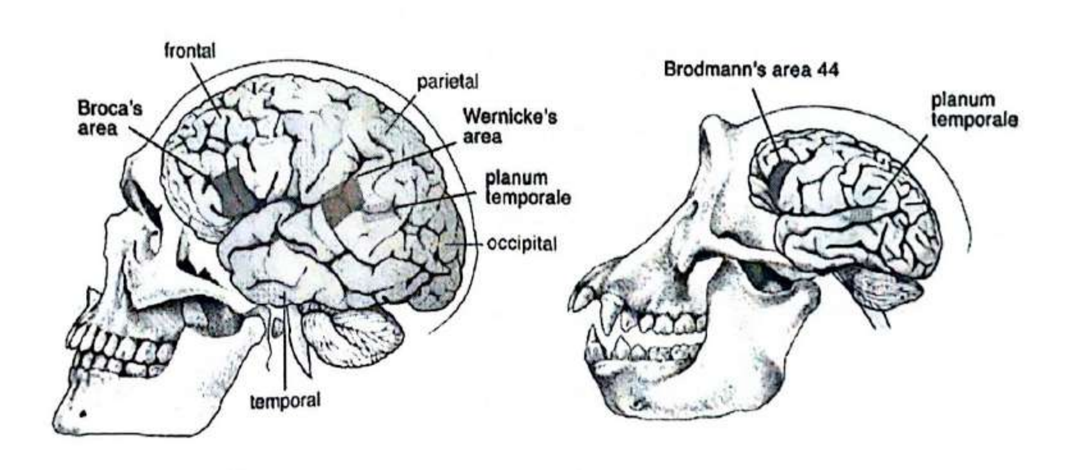
(2) استند بيابو في استنتاجه إلى دراسة 379 قاعدة من دنا النيندرتال لكن بعد صدور هذا الكتاب أجريت دراسات على قطع أكبر من الدنا أشارت إلى تزاوج *الإنسان العاقل* مع *إنسان النيندرتال* وأنواع أخرى من الأناسي. جينات هذه الأنواع باقية في جينومنا البشري. المترجمان

للدماغ ليس بالضرورة مؤشراً على قدرة أكبر، غير أن المؤشر الأهم هو الزيادة النسبية في حجم الدماغ مقارنة بكتلة الجسم. إن الدماغ عضو مُكلف جداً بسبب الطاقة التي يستهلكها وهي حوالي 25٪ من طاقة الإنسان البالغ (و60٪ من طاقة الرضيع). تمثل الزيادة النسبية في حجم أدمغة الأناسن في العصر البلستوسيني انحرافاً ملحوظاً عن المعدّلات الاعتيادية للثدييات والرئيسيات. وبينما تمتلك الدلافين والفيلة أدمغة أكبر كثيراً مما نملكه، إلاّ أن دماغنا، باعتباره نسبة من وزن الجسم، أكبر بـنحو 15 إلى 20 مرة مما لدى هذه الحيوانات. ولا يزال التحدي الذي يواجه علماء التشريح العصبي هو تحديد تلك الجوانب في زيادة الدماغ ذات الأثر الأكبر فيما يتعلق بقدرات الإنسان.

التقط إيميرسون بيو (Emerson Pugh) وهو عالم حاسوب في شركة IBM مقدار هذا التحدي حينما كتب: «إنْ كان عقل الإنسان بسيطاً بحيث نستطيع فهمه، فإننا سنكون على درجة من البساطة لن تمكّننا من ذلك». ولا يزال فهم الدماغ وفهم الأسس الأحيائية للسلوك من الجبهات العظيمة التي على علم الأحياء التغلّب عليها.

إن اضطلاع بعض مناطق الدماغ بوظائف الرؤية والحركة والإدراك قد تم دراسته باستفاضة في الثدييات والرئيسيات، ومن بينها الإنسان. يتكوّن الجزء الأكبر من دماغنا، القشرة المخية (cerebral cortex)، من صفيحة نسيج عصبي تغطي معظم الدماغ. أحد أجزاء هذه الصفيحة، وهو بنية ذات طبقات ست يسمى بالقشرة الحديثة (*neocortex*)، يوجد في الثدييات فقط. في الإنسان تنقسم القشرة اعتباطياً إلى عدة فصوص تُعيّن حدودها عبر أخاديد ونتوءات معيّنة في سطح الدماغ. ولقد نجح

علماء الأحياء العصبية بشكل خاص في تحديد وظائف الفصوص (الشكل 6,10). وهذا يشمل الفص الجبهي (frontal lobe) المضطلع بالتفكير والتخطيط والعاطفة، والفص الجداري (parietal lobe) المضطلع بالشعور بالألم واللمس والتذوّق والحرارة والضغط إضافة إلى الرياضيات والمنطق، والفص الصدغي (temporal lobe) المضطلع في المقام الأول بالسمع وأيضاً الذاكرة ومعالجة العواطف، والفص القذالي (القفوي) (occipital lobe)المضطلع بمعالجة المعلومات البصرية، والفص الحُوفي (limbic lobe) المضطلع بالسلوك الجنسي والعاطفي وبمعالجة الذاكرة.



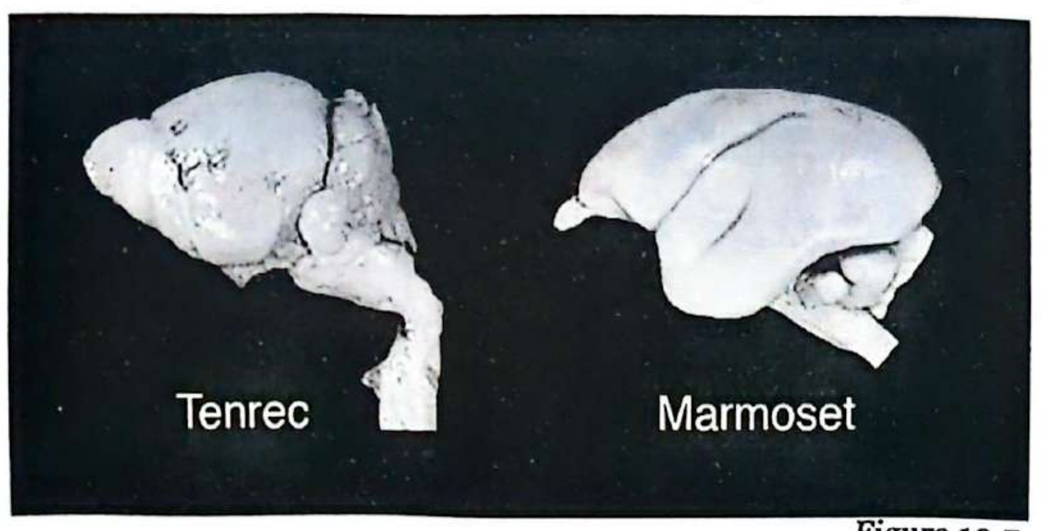
الشكل 6,10 **المعالم البارزة في أدمغة الإنسان والشمبانزي.** ترتبط منطقتا بروكا وفيرنكه في المستوى الصدغي في الإنسان بوظائف الكلام. الخصائص التشريحية المرتبطة بهذه الأبنية توجد في الشمبانزي أيضاً (رسم ليان أولدز)

إحدى مناطق القشرة الأولى التي حدّدت وظيفياً عيّن موقعها بول بروكا (Paul Broca)، الذي فحص عام 1861 دماغ مريض مصاب بسكتة استطاع التمتمة بكلمة واحدة فقط وهي «تان». وجد بروكا ضرراً أصاب الفص الجبهي للدماغ، واستنتج أن هذه هي منطقة

الكلام. لقد دُعِمت ملاحظات بروكا بأنواع عديدة من الأدلة بما في ذلك تصوير أدمغة أشخاص سليمين في أثناء المحادثة. ومنذ حقبة بروكا، حاول علماء التشريح العصبي المقارن تحديد المناطق التي قد تكون مركزية لتطوّر مواهب الإنسان. إن النقطة الرئيسية التي يمكن أن تستنتج من مقارنات البنى التشريحية للأدمغة تذكر بالقصص التي حكيتُها عن الاختراعات الأخرى مثل بقع جناح الفراشة، ومغازل العناكب، وأجنحة الحشرات، أي أن الشكل القائم للبنية مدين بوجوده لاختراعات عديدة سبقته. إن أدمغة الثدييات مميّزة مقارنة بما سبقها من حيوانات، وأدمغة الرئيسيات الأقدم كانت تحسيناً أُدخل على الأساس الثديي، والتطوّر الذي أحرزه دماغ النسّان والإنسان رُكّب فوق التصميم المتقدم لأدمغة الرئيسيات.

ثمة اختراع أساسي مبكر هو دون ريب القشرة الحديثة في الثدييات. لم يضف ذلك فقط قدرة المعالجة إلى الدماغ، بل مهّد الطريق لظهور تخصّصية تطوّرية في أنظمة جزئية وظيفية محددة. إن تغيّرات حجم الدماغ في الثدييات ليست مسألة تكبير جميع أجزاء الدماغ أو تصغيرها بشكل متناسب، بل يُظهر تطوّر الدماغ نمطاً «فسيفسائياً»، حيث تتغيّر أجزاء معينة منه بالتناغم مع أجزاء أخرى ولكن بشكل مستقل عن أجزاء أخرى. على سبيل المثال، إنَّ حجم دماغ التنريق (tenrec) (ثدييٌّ آكل للحشرات) مستثنى منه القشرة الحديثة أكبر مما لدى المارموست (marmoset) (أحد الرئيسيات)، لكن القشرة الحديثة للمارموست أكبر بعشر مرات تقريباً (الشكل 10 ,7). لقد توسّعت القشرة الحديثة في الرئيسيات بشكل عام بحيث إنها غدت أكبر بنحو 3 ,2 مرة مقارنة

بغيرها من الرئيسيات من ذوات وزن الجسم المشابه. في الرئيسيات كان التغيّر من الاعتماد على حاسة الشم إلى اعتماد أكبر على الرؤية مرتبطاً بتغيّر نسبي في حجم مناطق القشرة المضطلعة بكل مهمة.



الشكل 7,10 **تطور مناطق الدماغ الثدوي.** يمتلك التنريق (ثديي آكل للحشرات) قشرة مخية أصغر بكثير من المارموست (رئيسي). الإزاحات النسبية في أحجام مناطق الدماغ سمة شائعة لتخصصيتها. فضل الصور لكارول ديزاك (Carol Dizack) ووالي والكر (Wally Walker)، مجموعة ويسكنسون للدماغ الثدوي المقارن، جامعة ويسكنسون (The Wisconsin Comparative Mammalian Brain Collection. University of Wisconsin)

إضافة إلى التغيّرات في أحجام مناطق الدماغ بالنسبة لبعضها بعضاً تطورت مراكز جديدة. أحد مناطق دماغ الرئيسيات التي تبدو فريدة هي مركز لتنسيق الأنشطة الحركية الموجهة بصرياً. إن الوصول للأشياء، والإمساك بها، واستعمالها مهم لأنماط حياة الرئيسيات دون ريب. هناك منطقة تسمى الباحة أمام القشرة الحركية البطنانية (ventral premotor area) وهي تنشّط خلال الحركة الموجهة بصرياً، ومن المثير للاهتمام أنها تُنشَّط أيضًا عندما تراقب النسانيس هذه المهام قيد

التنفيذ. يشير ذلك إلى أن هذه الباحة أمام القشرة الحركية في الرئيسيات قد تكون حاسمة للتعلّم عبر الملاحظة البصرية.

ولأن الكلام واللغة لعبا دوراً كبيراً في تطوّرنا، فقد كان أصل هذه القدرات محل اهتمام شديد. في دماغ الإنسان توجد باحة بروكا في الباحة أمام القشرة الحركية في الرئيسيات وقد تكون متخصّصة في الكلام واللغة. لكن المسألة الملحّة هي ما إن كانت مناطق الدماغ المسؤولة عن هذه الأنشطة خاصة بالإنسان فقط. إن إحدى الخصائص التشريحية العامة المرتبطة بباحة بروكا هي أنها أكبر في النصف الأيسر من الدماغ منها في النصف الأيمن. نعلم أن النصف الأيسر من الدماغ يسيطر على إنتاج الكلام، ولذلك فقد اقتُرِحَ أن انعدام التناظر في منطقة بروكا يعكس تخصّصية نصف الكرة الأيسر. يتحكّم نصف الكرة الأيسر كذلك بالأيمنية، وإشارات اليد هي أيضًا جزء من عملية تواصلنا. تسمى الباحة الثانية للغة باحة فيرنكه (Wernicke area) وهي في الفص الصدغي (الشكل 10 ,6). يوجد في هذه الباحة موقع يسمى المستوى الصدغي، وهو مضطلع بالتواصل اللغوي والإشاري وبالموهبة الموسيقية، التي يسيطر عليهما نصف الكرة الأيسر أيضاً. يوجد لاتناظر تشريحي في هذه الباحة بنصف الكرة الأيسر في أغلب الناس، حيث يمتد أخدودٌ معين فيه إلى الخلف أكثر مما يحدث في النصف المخي الأيمن.

وقد رصدت هذه اللاتناظرات التشريحية في النسّانين الكبار أيضاً. يشير هذا إلى أن المناطق التشريحية التي غدت متخصّصة في الدماغ ظهرت أيضًا في السلف المشترك بين الإنسان والنسّانين الكبار. هناك كذلك أدلّة على أن التواصل لدى النسّانين في الأسر يسيطر عليه نصف

الكرة الأيسر، وهذا سيدعم الاستنتاج التالي بأن المعمار التشريحي للتواصل يسبق الأناسن بفترة طويلة. لكن دراسات أحدث أجريت على عدد أكبر من العيّنات لا تدعم هذا الاستنتاج.

هناك الآن دليل واضح في الإنسان على أن هذه اللاتناظرات التشريحية ليست قوالب ضرورية لإنتاج الكلام أو البراعة اليدوية. ففي حوالي 1 من 10 آلاف إنسان يكون اللاتناظر الأيسر-الأيمن الاعتيادي في توزيع الأعضاء الداخلية معكوساً (يسمى مقلوب الموقع situs inversus)، لكن هؤلاء الأفراد بشكل عام طبيعيون وظيفياً. أظهرت دراسات تصويرية حديثة لأدمغة الأفراد «المقلوبي الموقع» أن لاتناظرات اليسار-اليمين في الفص الجبهي والمستوى الصدغي هي أيضًا معكوسة. لكن في هؤلاء الأشخاص لا يزال إنتاج الكلام سائداً في نصف الكرة الأيسر، وهم بصورة عامة أيامن. تظهر هذه الملاحظات أن منطقتي اللاتناظرات التشريحية المعروفة منذ فترة طويلة في دماغ الإنسان ليست ضرورية لنموّ وظيفة الكلام واللغة.

أُجريتْ مقارنات عامة وتفصيلية بين دماغ الإنسان والنسّانين للبحث عن باحات أخرى قد تكون مسؤولة عن قدراتنا الوظيفية. هناك فكرة قائمة منذ زمن طويل أن باحات الدماغ المضطلعة بالتخطيط والسلوك التنظيمي والشخصية والعمليات الإدراكية «العليا» قد تختلف ما بين الإنسان والنسانيس. توجد هذه الخصائص في باحات في الفص الجبهي، وهو أكبر في الإنسان منه في الشمبانزي، لكن ليس على نحو غير متناسب. هل يمكن إذاً أن يكون ما يميِّزنا ذا طبيعة بالغة الدقة بحيث يصعب تمييزه وتحديده؟ ربما. ستوجد مُكوِّنات تطوّرنا

على الأرجح في «التشريح الدقيق» (microanatomy) لأدمغتنا، بما في ذلك الترابط بين مناطق القشرة، ومعمار دارات التوصيلات المحلية (local wiring circuits)، أو ترتيب العصبونات في القشرة المخية. على سبيل المثال، أبعاد الأعمدة العمودية للعصبونات في المستوى الصدغي تختلف في الإنسان عنها في الشمبانزي. إن التعديلات التطوّرية في عدد العصبونات وترتيبها، وفي ترابطها المتكوّن في أثناء النموّ في مناطق متخصّصة بأدمغة أسلافنا كان على الأرجح الطريق المؤدي لنشوء قدراتنا. ويسعى علماء الأحياء العصبية جاهدين حالياً في سباق محموم لمعرفة الفروقات الدقيقة بين أدمغة النسّانين والإنسان مستخدمين تقنيات عالية الدقة.

التطوّر الفسيفسائي لشكل الإنسان ونموّه

إن الاختلافات الجسمية بين شكل الإنسان الحديث والأناسن الأقدم والنسّانين الكبار هي نتيجة تغيّرات تطوّرية في النموّ. ولفهم طبيعة هذه التطوّرات أجريت دراسة مفصّلة حول معدّلات نموّ الإنسان والشمبانزي ونضجهما، وأيضًا استخلصت بعض الاستنتاجات من مواد أحفورية.

من الاختلافات الأساسية المعروفة منذ فترة طويلة بين نمو الشمبانزي والإنسان المعدل النسبي لنموّ الجمجمة ونضجها. يمتلك أطفال البشر جمجمة أقل نضجاً باعتبار شكلها مقارنة بما لدى أقرانهم من الشمبانزي رغم أن جمجمة الإنسان ودماغه يكونان أكبر بكثير حينها. يتباطأ نضج الجمجمة في الإنسان دراماتيكياً مقارنة بالشمبانزي،

وهو ما يسمح بحجم دماغ أكبر للإنسان في البداية. وفي نهاية المطاف تنمو الجمجمتان لذات الحجم، لكنهما تكونان مختلفتين في مقاس الوجه وحجم القِحْفِ (braincase). ويشير التبدّل النسبي في معدّلات نضج الجمجمة إلى أن توقيت عمليات النموّ المتشابهة قد تبدّلت.

أظهرتْ دراسة أحافير الأناسن تبدّلات تطوّرية في توقيت عمليات النموّ الأخرى. يمكن لعلماء الأحافير أن يميّزوا من أنماط طبقة المينا في أحفورة سن أن أوقات تشكيل الأسنان كانت أقصر في أنواع أناسن الجنوب والأناسي الأقدم مقارنة بالإنسان الحديث. توفّر مراحل نموّ الأسنان مؤشرات موثوقة على مراحل نموّ الأطفال والعمر النسبي للنضج الجنسي. ويكشف السجل الأحفوري أن هذه الجوانب من جسم الإنسان الحديث قد ظهرت بعد ظهور تغيّرات أخرى كالتي شملت حجم الدماغ وأبعاد الجسم. وعلى النقيض من ذلك، نجمت جميع تغيرات الهيكل العظمي المصاحبة لانتصابنا على قدمين عن تغيّرات بنائية في العظام والجهاز العضلي، وهي تغيّرات حصلت قبل حدوث النضج الأبطأ للجمجمة وبشكل مستقلّ عنها. وبالإجمال فقد اتسمت صورة تطوّر الأناسن بنمط فسيفسائي، حيث تظهر صفات مختلفة في أوقات مختلفة وتتطوّر بمعدّلات مختلفة في تاريخ الأناسن.

إن أهمية النمط الفسيفسائي لتطوّر الإنسان من منظور الإيفوديفو هو في كونه يدلنا على أن البنى المختلفة تطوّرت بشكل متقطّع ولاخطي خلال مدة طويلة من الزمن. ويبدّد السجل الأحفوري أية فكرة عن تغيّر لحظي مفاجئ في شكل الإنسان. بدلاً من ذلك، تضمن تاريخنا تبدّلات كمية في حجم الدماغ والجمجمة وأبعاد الجسم ومدة الحمل ونموّ

الأطفال، وهي تغيّرات استوعبت عبر عشرات الآلاف من الأجيال. إضافة إلى ذلك، لم تكن معدّلات التغيّر في سمات الإنسان استثنائية قياساً على ما كان يحدث في الثدييات الأخرى خلال المدة الزمنية لتطوّر الإنسان، فمثلاً تُظهر أحافير الخيول معدّلات مماثلة للتغيّر في حجم الجسم والسمات الأخرى.

تخبرنا جملة الأدلة أن تطوّر شكل الإنسان لم يكن خاصاً أو شاذّاً عن سائر الحيوانات. ينبغي أن نتوقع أن ما نعرفه عن تطوّر شكل الحيوان ينطبق بشكل عام أيضًا على الإنسان. في الواقع، إن علاقتنا الجينية الوثيقة جداً بالشمبانزي، إضافة إلى التشابه الجيني للرئيسيات بالثدييات الأخرى، يؤكد ثيمة غدت مألوفة. إن مجموعات الجينات التي تصنع هذه الحيوانات والإنسان متشابهة جداً، لذلك لا بدّ أن ترجع اختلافات الشكل بينها، سواء الاختلافات الصغيرة أو الكبيرة، لاختلافات في كيفية استخدام الجينات أو، كما سنرى في حالة واحدة، لعدم استخدامها.

مفارقة 98,8٪ وصناعة *الإنسان العاقل*

إن السبب المطلق للتغيّر النمائي والجسمي في تطوّر الإنسان هو سبب جيني. في مكان ما في الدنا لدينا تكمن الاختلافات بين الإنسان الحديث والنسّانين والأناسن الأقدم. الأسئلة المفصلية هي:

أ) كم عدد التغيّرات المهمة؟

ب) أين تقع؟

ج) كيف أسهمت في تغيرات الشكل؟

الخبر الجيد هو أننا نمتلك الآن السلسلة الكاملة لجينومات الإنسان والشمبانزي والفأر.

الخبر السيئ يأتي من إجرائنا بعض الحسابات.

تحتوي متوالية دنا الإنسان على حوالي 3 بلايين زوج من القواعد. ويتطابق دنا الشمبانزي معنا بنسبة 98,8٪. إن الاختلاف 1,2٪ فقط، وهو أصغر اختلاف بيننا وبين أي حيوان آخر على الكوكب، لكنه اختلاف يترجم إلى *36 مليوناً* من أزواج القواعد المختلفة. ولأن الإنسان والشمبانزي افترقا عن سلف مشترك قبل حوالي 6 ملايين سنة، فإنه يمكننا أن نفترض أن نصف هذه الاختلافات خاصة بالشمبانزي (أي أنها حدثت في خطّ الشمبانزي) ونصفها الآخر خاص بالإنسان (أي حدثت في سلالتنا). يمثّل هذا 18 مليون تغيّر في سلالتنا منذ سلفنا المشترك الأخير مع الشمبانزي. (أُبسط الأرقام هنا قليلاً لأغراض النقاش، فلا أعُدُّ القواعد المحذوفة أو المضافة، ولا اكتساب عناصر دنا أكبر ولا فقدها).

هل جميع هذه التغيرات مهمة؟ أم أن بعضها مجرد ضجة فارغة؟ كيف يمكننا أن نقرر أي اختلاف من بين هذه الـ 18 مليون تغيّر قد ساهم في التطور؟

نعلمُ أن ليس جميع التحولات في جين ما مؤثرة. ولأن الشفرة الجينية تتسم بالحشو،[1] يمكن لبعض القواعد أن تتغيّر دون إحداث تغير في البروتين. تتراكم هذه الاستبدالات «الصامتة» بمرور الزمن لقلة أو

(1) ورد مصطلح الحشو (redundant) في الفصل السابع ويعني وجود بنى مكررة تؤدي الوظيفة ذاتها. في هذا السياق يشير إلى أن الحمض الأميني الواحد يشفر من خلال متواليات دنا مختلفة. المترجمان

انعدام الضغط الانتخابي لإزالتها. إضافة إلى ذلك، لأن ما يقارب 5٪ فقط من الدنا لدينا يضطلع بوظائف تشفيرية أو تنظيمية، فإن الطفرات التي تحدث في مكان آخر في قسم كبير من متوالية دنا الإنسان تترك تبعات قليلة أو منعدمة. أيضًا، ينبغي النظر في معلومة أخرى وهي أن أي شخصين لا يمتّ أحدهما بصلة بالآخر سيختلفان في المتوسط في حوالي 3 ملايين قاعدة. بينما يبدو ذلك عدداً كبيراً بالأرقام المطلقة، إلاّ أنه يشكّل 1 ,0٪ فقط من مجموع قواعد الدنا لدينا، وبغض النظر عن هذه الاختلافات فإننا ننتمي بوضوح لنوع واحد. يخبرنا هذا أن ملايين الاختلافات قد تكون عديمة التبعات أيًا كانت. لذلك، لا يعلم أحد في الحقيقة عدد التغيّرات التي صاغت شكل الإنسان. تخميني أن العدد سيكون قريباً من عدة آلاف. التحدي القائم هو أن نجد تلك الاختلافات المهمة.

قبل أن أتقدم في تحليل الاختلافات بين الشمبانزي والإنسان، أعتقد أن المفارقة وحلها العام يصبحان أوضح عندما نقارن جينوم الإنسان بثدييٍّ آخر وهو الفأر. ينتمي الفأر للقوارض، وقد افترقت سلالتا القوارض والرئيسيات قبل فترة طويلة تقدّر بحوالي 75 مليون سنة. يتميّز الفأر بصغر حجمه، ويمتلك قشرة حديثة لكنها أصغر كثيراً مقارنة بما لدى الرئيسيات، وهي بكل تأكيد ضئيلة مقارنة بما لدينا. لكن مقارنة جينومات الفأر والإنسان تكشف عن وجود نظائر لأكثر من 99٪ من جينات الإنسان في الفأر، والعكس صحيح. وفي الواقع فإن الترتيب النسبي لـــ 96٪ من الجينات الموجودة في كروموسومات الإنسان مطابق للترتيب النسبي الموجود في كروموسومات الفأر. إنها درجة تشابه لافتة. تخبرنا هذه الأرقام أنه خلال 75 مليون سنة من تطوّر الثدييات،

وعلى الأقل خلال 55 مليون سنة من تطوّر الرئيسيات، احتوى جينومنا وجينوم الحيوان القارض أساساً على ذات الجينات التي كانت غالباً في ذات الترتيب. لم تلعب الاختلافات في عدد الجينات وترتيبها دوراً كبيراً، إنْ وُجد، في نشوء أنواع الإنسان أو الرئيسيات.

إن لم يكن عدد الجينات وترتيبها، فما الذي يمكنه شرح الاختلافات الكبيرة بين الفأر والإنسان؟ تختلف متواليات البروتينات المشفرة من قبل جينات الفأر والإنسان في حوالي 30٪ في المتوسط. لكن بناء على ما رأينا حتى الآن، هل يُحتمل أن تكون الاختلافات في متواليات البروتين هي المسؤولة عن أغلب تغيّرات الشكل؟

لا أعتقد ذلك عموماً. أدلي بهذه الحجة بناءً على ما نعرفه من الأنواع الأخرى وليس من معطيات تجارب مباشرة على الإنسان، لكنني أعتقد أن هذا الاستنتاج لا مفرّ منه بناءً على أدلة متعدّدة. أولاً، أغلب بروتينات الجسم لا تؤثر في الشكل، إنها تؤدي مهاماً أخرى في الفيزيولوجيا. يمكن أن توجد بعض الفروقات المثيرة للاهتمام في البروتينات المضطلعة بالفيزيولوجيا مثل حاسة الشم والمناعة والتكاثر، لكن هذه لا تؤثّر في الشكل الذي يظهر عليه الإنسان أو الفأر. ثانياً، بروتينات عدّة الأدوات تمثّل جزءًا صغيراً من مجموع بروتينات الجسم، ورأينا أن لكل بروتين منها عادة عدة وظائف في النموّ، لذلك لا يُرجّح أن تتغيّر بطرق مؤثّرة (لأن الطفرات ستؤثر على جميع الوظائف، وليس على واحدة فقط). بدلاً من ذلك، وكما رأينا في فصول سابقة، فإن التغيّرات في المفاتيح الجينية مسؤولة عن اختلافات كثيرة في شكل الحيوان. ولأن تطوّر الإنسان هو بشكل كبير مسألة تطوّر الحجم والمظهر والتشريح الدقيق

للأبنية، وأيضًا تطوّر التوقيت في النموّ، فمن المنطقي أن يكون تطوّر المفتاح مهماً في تطوّر الإنسان أيضًا. كل ما في أجسامنا هو تحوير في قالب الثدييات أو الرئيسيات. وعليه، فإنني أعتقد أن كفّة الدليل الجيني تخبرنا أن تطوّر الرئيسيات والنسّانين الكبار والإنسان ناجم عن تغيّرات في التحكّم بالجينات أكثر من أن يكون عن تغيّرات في البروتينات التي تشفرها الجينات.

لستُ أول من يصل لهذا الاستنتاج، ففي دراسة كلاسيكية أجريت قبل ثلاثة عقود أظهر ألن ويلسون (Allan Wilson) وماري كلير كنج (Mary Claire King) أن متواليات بروتينات الشمبانزي والإنسان كانت متطابقة تقريباً واستنتجا أن الاختلافات التطوّرية كانت ناجمة عن تغيّرات في التحكّم بالجينات. وصل لذات الاستنتاج حشد من علماء الأحياء البارزين في ستينيات وسبعينيات القرن الماضي، منهم لينوس باولينج (Linus Pauling)، وإيميلي زكركاندل (Emile Zuckerkandl)، وإريك دافيدسون (Eriç Davidson)، وروي بريتن (Roy Britten)، وفرانسوا جاكوب (François Jacob). لكننا لم نعلم في ذلك الوقت أي شيء عن منطق المفاتيح الجينية في الحيوانات ووظيفتها، ولا حتى عن جين واحد يتحكم بالنموّ. إن كفة الدليل من الإيفوديفو وعلم الجينومات المقارن تخبرنا أن هذه الاستنتاجات المبكّرة كانت في الطريق الصحيح.

لكن بالرغم من أهمية مفاتيح جينات الإنسان، فإن دراستها أصعب بكثير مقارنة بالأنواع الأخرى (لأننا لا نستطيع دراسة وظيفتها في أجنّة الإنسان الحية)، ما يجعلُ تحديد التغيّرات التطوّرية في مفاتيح الإنسان عملاً مليئاً بالتحدي. وبينما تبذل حالياً جهود متعدّدة الأشكال يظل

أسهلها حتى الآن اكتشاف الاختلافات في المتواليات المشفرة للبروتينات التي قد تكون مسؤولة عن تطوّر الإنسان أو مرتبطة بجوانبه. سأركز على جينين شاركا في تطوّر الإنسان. توضح قصتاهما نوع التقصّي والبحث المطلوب لربط جينات معيّنة بتطوّر صفات الإنسان. ينبغي أخذهما بمثابة أمثلة شارحة للكيفية التي يُصنع بها هذا الرابط؛ كالنجوم الأولى التي تلتمع أمامنا بمجرد استخدامنا لمنظار جيني جديد. إنهما ليسا بالضرورة، ولا حتى على الأرجح، المسبّب الجيني الأهم أو الوحيد لتطوّر هذه الصفات.

تطوّر عضلات فكّ الإنسان

من ضمن الصفات التي تميّزنا عن القردة الأخرى أو عن الأناسن المبكّرة مثل أنسن الجنوب العفري حجم عضلات فكّنا المقلّص. تمتلك الرئيسيات الحية مثل المكاك (macaque) أو الغوريلا عضلات فك قوية كبيرة لمضغ الطعام. العضلة التي ترفع الفك السفلي تسمى بالعضلة الصدغية (temporalis) وهي مرتبطة بأغلب المنطقة الصدغية في أدمغة الرئيسيات الحية، لكنها قُلِّصت كثيراً بما يتناسب ودماغ الإنسان (الشكل 10 ,8).

اكتُشف أحد الأدلة الجينية على ظهور التبدّل في حجم عضلة الفك من قبل هانسل ستيدمان (Hansell Stedman) وزملائه في جامعة بنسلفانيا. لاحظوا أن جين الإنسان الذي يُشفّر بروتيناً معيناً يُسمى سلسلة الميوسين الثقيلة 16 (MYH16. myosin heavy chain 16 اختصاراً) أصيب بطفرة عطّلت أغلب متوالية البروتين. وتؤدي متواليات الميوسين الثقيلة دوراً



الشكل 8,10 **تطوّر عضلات الفك في الرئيسيات.** يمتلك المكاك والغوريلا منطقة صدغية كبيرة تتصل بها عضلات الصدغ. هذه المنطقة الكبيرة ضرورية لتوليد قوة كافية للفك الكبير وضغط مضغ الطعام لدى هذه الحيوانات. أما في الإنسان فالعضلة الصدغية أصغر بكثير؛ وهذه الصفة مرتبطة بطفرة واحد على الأقل في بروتين ليف عضلي. (الصورة تقدمة د. هانسل ستيدمان (Hansell Stedman)، طبعت بإذن من مجلة «نيتشر» *Nature* (2004): 415).

مهماً عبر كونها جزءًا من الألياف في العضلات التي تنقبّض مولّدة القوة. عندما تغيب هذه البروتينات أو تتغيّر، فإن حجم الألياف والعضلات يتقلّص.

MYH16 نوع متخصّص من الميوسين يوجد في جزء من العضلات فقط. في المكاك يصنع MYH16 في العضلة الصدغية وعضلة أخرى مجاورة، لكن ليس في العضلات الأخرى. وينشط جين MYH16 الخاص بالإنسان في العضلة الصدغية، ولكن طفرة في الجين عطّلت وظيفة البروتين. إن ألياف العضلة في الصدغ البشري هي بحدود ثُمن حجمها في المكاك. هذا الدليل الجيني والتشريحي يشير إلى أن تعطيل البروتين MYH16 مرتبط بشكل ما بتقلّص عضلة الصدغ في وقت ما أثناء تطوّر النسّانين الكبار.

متى حدث هذا التغير الجيني؟ حدث بكل تأكيد بعد انفصال سلالتيْ الإنسان والشمبانزي لأن الشمبانزي (كما هو الحال في القردة والنسانيس الأخرى) يمتلك نسخة سليمة من جين MYH16 تشفّر بروتين MYH16 كامل الحجم. بناء على عدد التغيّرات في جين الإنسان مقارنة بالأنواع الأخرى، قدّر فريق بنسلفانيا أن الطفرة المعطلة قد حدثت قبل حوالي 2,1 إلى 2,7 مليون سنة. وهذا قريب بشكل مثير من الفترة التي نشأ فيها جنس *الإنسان*.

إن أهمية التقلّص التطوّري في عضلات الفك تتجاوز كيفية مضغ الأناسن طعامها. للبنية التشريحية للعضلات تأثير كبير على نموّ العظام، وأظهرت الدراسات التجريبية أن لنموّ عضلة الفك تأثيراً هاماً على حجم الهيكل القحفي الوجهي (craniofacial) وشكله. تقلص عضلات الفك والقوة المفروضة على الفك السفلي سيقلل الجهد على عظام الجمجمة، وهذا ربما سمح لِقحف الرأس أن يغدو أرق وأكبر. وعليه، فإن التوسع في حجم الدماغ الذي أحدث تغيّراتٍ في جنس الإنسان وهو في بداياته الأولى ربما مُكّن، لدرجة ما، عبر تغيّرات في عضلات الفك وخصائص الجمجمة ذات الصلة. أضف إلى ذلك، من المحتمل أن يكون تقلّص عضلات الفك قد سهّل التطوّر النهائي للتحكّم الدقيق بالفك السفلي، وهو تحكمٌ ضروري للكلام.

جميع هذه الروابط والعلاقات آسرة، لكن يجب أن نكون حذرين كي لا ننسب جميع هذه التغيّرات التشريحية إلى طفرة واحدة. بينما كان تعطيل جين MYH16 الذي كان قبل ذلك فاعلاً هو حدث جدير بالملاحظة بكل تأكيد، إلاَّ أنه لا يمكننا القول إن كانت هذه الطفرة المعطلة هي

التغيّر الجيني الذي أطلق عملية تقليص الصدغ، أو إن كانت واحدة من سلسلة تغيّرات متتابعة أو متوازية، أو أنه التغيّر الأخير الذي حدث حينما غدا دور بروتين MYH16 في الصدغ غير ضروري. ولأسباب سأشرحها بعد قليل، لا يوجد سبب للتأكيد على أنه العامل الحاسم والوحيد الذي أطلق هذه العملية التطوّرية، وسيكون من الصعب دائماً تأكيد ذلك بالنسبة لأي جين آخر ساهم في تطوّر الإنسان كما هو الحال في الاكتشاف الأخير لجين ساهم في تطوّر الكلام في الإنسان.

تطوّر جين يؤثر في الكلام

من الميزات التي يمتلكها الباحثون عن جينات بشرية ذات أهمية تطوّرية محتملة وجود أعداد كبيرة منا، حوالي 6 مليارات الآن، وعندما لا تُؤدى وظيفة ما بشكل سليم، يذهب الناس للعيادات. يسمح هذا باكتشاف الطفرات الجينية حتى تلك النادرة جداً التي يمكن أن تحدث مرة واحدة في كل مليار نسمة. وقد اكتُشف أحد الأمثلة المدهشة على طفرة نادرة جداً وغنية بالمعلومات في عائلة صغيرة أصيب ثلاثة أجيال من أفرادها بخلل بالغ في الكلام واللغة. الأكثر إثارة في الأفراد المصابين هو أن الخلل ليس ناجماً عن مشكلة عضلية ما في إنتاج الكلام، وإنما أصيبوا بعجز في الدارات العصبونية (neural circuitry) التي تؤثّر في عمليات اللغة. أظهرت أحدث تقنيات التصوير أن الأفراد المصابين عانوا من اختلالات قابلة للكشف في بعض مناطق الدماغ. إضافة إلى ذلك أظهر تصوير الرنين المغناطيسي للأعضاء المصابين في أثناء أداء مهام صامتة (تفكير) ومنطوقة نشاطاً ضعيفاً في باحة بروكا وبضع باحات

أخرى مرتبطة باللغة. يظهر أن المرضى يعانون من عجز في الشبكة العصبونية المصطلعة بالتعلم و/ أو التخطيط وأداء الكلام المتتابع.

تم تحديد الجين الطافر في هذه العائلة وهو يُسمى فوكس بي2 (*FOXP2*). إن بروتين فوكس بي2 هو عامل نسخ (transcription factor): بروتين عدّة أدوات يلتصق بالدنا ويتحكم بنشاط جينات أخرى. تُغيّر هذا الطفرة حمضاً أمينياً واحداً في فوكس بي2، ويبدو أن هذا التغيّر الواحد يقضي على وظيفة بروتين فوكس بي2. ولأن هؤلاء المرضى يحملون أيضًا نسخة واحدة من جين فوكس بي2 السليم، فإنهم يمتلكون بعضاً من فعالية فوكس بي2. إن الخلل في الكلام واللغة ناجم عن تقلّص الكمية الكلية لبروتين فوكس بي2 الفعّال، وليس لفقدانه بالكامل. لعل السؤال الأول الذي يقفز إلى الأذهان: هل فوكس بي2 جين بشري فريد؟

أرجو أن يكون ما قلته في الفصول الماضية قد أعدَّكم لتخمين إجابة هذا السؤال. لا، فوكس بي2 ليس جيناً فريداً بالإنسان بتاتاً. لقد تم تمييز الجين في عدد من الرئيسيات والقوارض ونوع من الطيور. هذا التوزّع مثالي لجينات عدّة الأدوات البشرية التي يوجد لأغلبها، إن لم يكن جميعها، نظراء في الأنواع الأخرى. في الحقيقة، تختلف النسخة البشرية من بروتين فوكس بي2 عمَّا في الفأر في 4 مواقع من 716 موقعاً، وعمَّا في السعلاة في 3 مواقع، وعمَّا في الغوريلا والشمبانزي في موقعين فقط. إن هذا التغيّر في المتوالية أقل مما يحدث في معظم البروتينات الأخرى، مشيراً إلى وجود ضغط كبير لحفظ متوالية بروتين فوكس بي2 خلال تطوّر الثدييات.

هل لعب تطور جين فوكس بي2 دوراً في نشوء الكلام واللغة؟ إن هذا السؤال معقد جداً؛ إن التغيرات في جين فوكس بي2 أكثر دقة من

الطفرة المعطلة لجين MYH16. هناك طريقة أخرى لاختبار إذا ما كان أحد الجينات قد لعب دوراً حديثاً في التطوّر عبر البحث علامات ما يُسمى بـ «الكنْس الانتخابي» (selective sweep). يمكن أن يترك فعل الانتخاب الطبيعي توقيعه على صورة نمط من التفاوت في متوالية الدنا الناشئة بعد انتخاب الطفرة المفضّلة. التفاوت على طول متوالية الدنا يتراكم بمرور الوقت ما لم، أو إلى أن، يتدخل الانتخاب لتفضيل متوالية منها، وهو ما يسبب عند حدوثه «كنساً» يقلل التفاوت العام. ومن نمط التفاوت المقلص في جين ما مقارنة بجيرانه يستطيع علماء الجينات الإخبار إن كان هذا الجين قد تعرض لكنس انتخابي. إن إشارة الكنس الانتخابي في موقع جين فوكس بي2 البشري هي إحدى أقوى الإشارات مقارنة بالجينات البشرية الأخرى. ويشكل دلالة جيدة على أنه ولفترة ما في الـ 200 ألف سنة الماضية خلال تطوّر نوعنا حدثت طفرات في جين فوكس بي2، وفُضّلت وانتشرت في جميع نوع *الإنسان العاقل*.

ما هي التغيّرات التي طرأت على فوكس بي2 ويمكن أن تكون قد ساهمت في تطوّر الكلام؟ يوجد فقط اختلافان في الشفرة بين بروتينيْ الإنسان والشمبانزي. وبينما يمكن أن تكون هذه التغيّرات مسؤولة عن تطوّر الكلام، إلا أن هناك المئات من التغيّرات الأخرى في الدنا غير المشفِّر حول فوكس بي2، في المفاتيح والمناطق التي تؤثر في مكان نشاط فوكس بي2 وكميته. من الصعوبة بمكان تحديد التغيّرات التي يمكن أن تكون مؤثّرة في تطوّر الإنسان باستخدام التقنية الحالية. أراهن على المناطق غير المشفِّرة لأن تصليح مفاتيح جين فوكس بي يسمح بالضبط الدقيق اللازم لنشاط فوكس بي2 في تكوين الشبكات العصبونية. من

المعروف أن فوكس بي2 ينشط في مواقع عديدة في الدماغ النامي في الإنسان، وأيضًا في المناطق المناظرة في الفأر، وعليه يظهر أن لجين فوكس بي2 دوراً واسع الانتشار في نموّ الدماغ في الثدييات. ليس واضحاً بدقة حتى الآن ما يفعله فوكس بي2 في النموّ، لكنه على الأرجح يؤثّر في كيفية تشكل المناطق الفرعية (subregions) في الدماغ وكيف ترتبط بالأجزاء الأخرى. لكن، وكما قلتُ مراراً وتكراراً، يصعبُ تغيير بروتين عدة أدوات بحيث يتأثر جزء معين من وظائفه فقط، أظن أن تطوراً في المفاتيح المتحكّمة في جين فوكس بي2 مكّن تطوّر الاختلافات الدقيقة في مناطق الدماغ المختلفة.

الأساس الجيني الدقيق والمعقّد لتطوّر الإنسان

ولّدت اكتشافات فوكس بي2 و MYH16 قدراً كبيراً من الإثارة في الدوائر العلمية والطبية، وأيضًا في الإعلام. لكن هل هما القصة الكاملة لنمو وتطور عضلات الفك وشكل هيكل القحفي الوجهي، أو للكلام واللغة؟ إطلاقاً لا. إنهما البداية فقط. لكي نضع اكتشاف فوكس بي2 و MYH16 ودورهما في السياق يجب أن نتخلص من احتمالية قائمة منذ فترة طويلة في أوساط عديدة -متضمناً الوسط العلمي إضافة للإعلام العام، وهي تخيّل حدوث التطور بقفزة واحدة عبر حدوث طفرة دراماتيكية واحدة. مثل هذه الأفكار قُدِّمت لتفسير نشوء الكلام واللغة وصفات الإنسان المعقدة الأخرى، وهي مرتبطة عادة بفكرة أن تطوّر بعض السمات كان «سريعاً». لكننا رأينا أن حجم الدماغ والبنية التشريحية للهيكل العظمي ونموّ الأسنان ومظهر الجمجمة والملامح

الأخرى تطوّرت عبر عشرات الآلاف من الأجيال أو أكثر. لا يوجد داعٍ أو حاجة لاستدعاء طفرات دراماتيكية مفردة باعتبارها مسبّبات للقفزات الكبرى في الشكل والوظيفة أو تفسيراً لنشوء صفات الإنسان، ولا حتى يوجد أي أساس علمي للبرهنة على ذلك.

إنّ مصطلح «المعمار الجيني» (genetic architecture) قد سُبكَ للإشارة إلى عدد الجينات المشاركة في تطوّر صفة معينة والتأثير النسبي لكل منها. أظهرت عقود من العمل على السمات الكمية مثل حجم الجسم أو عدد بنى معينة أن التفاوت في الأنواع، أو الاختلافات بين الأنواع تنجم عادة عن العديد من الاختلافات الجينية التي يضطلع كلٌّ منها بتأثير صغير نسبياً. يوحي ذلك أن التبدّلات التطوّرية في السمات تحدث من خلال زيادات صغيرة، عبر تغيّرات في جينات عديدة محتملة. إن المعمار الجيني لتطوّر صفة بشرية لا ينبغي أن يكون مختلفاً، وفي الواقع تشير دراسات التفاوت البشري إلى أن جينات عديدة تساهم في اختلافات الطول وحجم الجسم والسمات الكمية الأخرى. لا نعلم إن كان تعطيل MYH16 خطوة مبكرة في تطوّر عضلات الصدغ، أم أنها خطوة متأخّرة جداً بعد أن أصبح تطوّر وظيفة MYH16 غير مؤثّر. هناك احتمال كبير أن تغيرات في جينات أخرى قد ساهمت في تقليص عضلات الفك عبر فترة زمنية طويلة. بالمثل فإن جين فوكس بي2 هو بكل تأكيد جزء واحد فقط من قصة تطوّر الكلام. ينبغي أن نتوقع أن انتخاب تغيّرات تطوّرية في جينات أخرى، أو أكثر تحديداً في مقابسها الجينية، ساهم أيضًا في تطوّر هذه الموهبة البشرية. نعلم عن فوكس بي2 بسبب ضربة حظ، طفرة تحدث مرة في كل بليون، وقد تصادف أنها طفرة يمكن رصدها طبياً

عندما تحدث في نسخة واحدة فقط من الجين. ونعلم عن MYH16 لأننا نستطيع بسهولة رؤية أن هذا الجين كان معطلاً. هناك جينات عديدة تنتظر الاكتشاف والدراسة، جينات صاغت تاريخ تطوّر الإنسان، ولبعضها تأثير وتاريخ أدق بكثير مقارنة بهذين الجينين.

لأن العديد من القصص الشبيهة بفوكس بي2 وMYH16 ستكتشف، فإنه ينبغي مقاومة الميل الطبيعي في معاملة الاكتشافات الجديدة لأحفورة، أو باحة في الدماغ، أو لجين معيّن باعتبارها الحل النهائي لأحجية تطوّر الإنسان. بدلاً من ذلك، تمثّل أغلب الاكتشافات قطعاً مفردة لفسيفساء أكثر تعقيداً. يقرّ علم أصل البشر الآن بنمط معقداً لتطوّر الأناسن بوجود أنواع أكثر مما تصوّرناها سابقاً، وأيضاً بوجود العديد من الفروع الميتة عوضاً عن خط مستقيم وحيد يمتد من سلف بعيد للإنسان الحديث. في الواقع كلما اكتشفت أحافير أخرى متكتلة قرب النقطة التي تشعبت منها سلالات الإنسان والشمبانزي، تحتّم النظر بالشك والريبة حيال مزاعم إيجاد «السلف». بالمثل، يجب أن يبحث علم الأحياء العصبية المقارن عن شروحات أبرع لقدرات الإنسان حيث يبدو أن الباحات التشريحية الواضحة في الدماغ تمتلك جذوراً أعمق عما اعتُقِدَ بدايةً وهي لا تفسر بصرامة سلوك الإنسان. وبالمثل أيضاً، من غير المحتمل جداً أن تطوّر أي صفة من الصفات التي تحدّدنا -ثنائية القدم، والشكل الهيكلي العام، والشكل القحفي الوجهي، وحجم الدماغ، والكلام -كان نتيجة لانتخاب جينات رئيسية معدودة. إن فوكس بي2 وMYH16 أول قطع الأحجية التي يجب أن تحل، لكن لا يوجد أي سبب للاعتقاد أنها أكبر القطع أو أكثرها أهمية. الصورة الأكثر ترجيحاً هي أن تطوّر الأناسن قد

تكوّن عبر الانتخاب من بين نسخ متفاوتة لجينات عديدة مسؤولة عن زيادات صغيرة في اختلافات الحجم والمظهر ومكوّنات الأنسجة خلال فترات زمنية منفصلة مكوّنة من عدة آلاف من الأجيال.

أذكر هذا التحذير لتبسيط الاكتشافات الجديدة وليس للقضاء على الإثارة، إنما لوجود قضايا أكبر على المحك عند محاولة حل شفرة الأساس المادي لتطوّر الإنسان. واجه علم الأحياء التطوّرية مقاومة منذ ولادته وكان من الصعب أن تحظى بالقبول المفاهيم الأساسية المشتقة من معطيات شديدة الصلابة حول عصافير الشرشوريات والعثّ وذباب الفاكهة. وتحتاج بعض المزاعم حول تطوّر الإنسان إلى مراجعة بكل تأكيد نظراً لتوافر معطيات جديدة، كما حدث باستمرار في علم أصل البشر خلال القرن الماضي. يحاول خصوم علوم التطوّر على الدوام استغلال حتى التصريحات الحذرة للعلماء كدليل على الشك أو عدم اليقين، وكأساس لعدم تدريس المبادئ التطوّرية. لربما كان التبسيط ضرورياً في الواقع للمقالات الصحفية، لكنه يمكن أن يشوّه الحقائق الدقيقة والأكثر تعقيداً للأنماط التطوّرية وآلياتها.

إن اكتشافات الإيفوديفو تضيء العمليةَ التطوّرية وأحداثاً تطوّرية معيّنة بطرق فعّالة مبتكرة. فقد وسّع الإيفوديفو أسس علم الأحياء التطورية، وغيّر الطريقة التي نفكر بها، وزوّدنا بفرصة جديدة لنغيّر الطريقة التي يُعرض ويُعلّم ويناقش بها علم الأحياء التطوّرية. في فصلي الختامي، سأناقش مكان الإيفوديفو في البناء التطوّري الإجمالي والدور الذي يجب أن يلعبه في تدريس علم الأحياء التطوّرية، وفي الجدل الاجتماعي الدائم حول التطوّر.



تنوّع أصداف البحر وجمالها الهندسي (جيمي كارول)

الفصل 11

أشكال لا نهائية غاية في الجمال

لاحظ دائماً أن كل شيء هو نتيجة للتغيّر، واعتد على التفكير أن لا شيء أحبّ إلى الطبيعة أكثر من تغيير الأشكال القائمة أو صناعة أشكال جديدة تشبهها.

– الإمبراطور ماركوس أوريليوس أنطونيوس
إمبراطور روماني (161–180 م)

أنهى دارون الطبعة الأولى من «أصل الأنواع» بمقطع ربما غدا أكثر المقاطع اقتباساً في الأحياء:

هناك عظمة في هذه النظرة إلى الحياة، وقواها المتعدّدة، التي نُفثت أصلاً في أشكال محدودة أو في شكل واحد، وأنه بينما كان هذا

الكوكب يواصل دورانه حسب قانون الجاذبية الثابت، تطوّرت ولا تزال تتطوّر، من بداية بالغة البساطة، أشكال لانهائية غاية في الجمال والروعة.

لقد استغرق داروِن حوالي عشرين عاماً ليصل إلى هذه الصياغة. ففي مسودات أقدم لأفكاره كتبت عامي 1842 و1844 لكنها لم تنشر بتاتاً كان هذا المقطع أطول ومختلفاً بشكل ملحوظ. كان مقطع 1842 كالتالي:

«هناك عظمة بسيطة في هذه النظرة إلى الحياة وقدراتها على النموّ، والاستيعاب، والتكاثر نفثت أصلاً في مادة في شكل واحد أو بضعة أشكال، بينما كان هذا الكوكب يواصل دورانه حسب قوانين ثابتة، وحلّت اليابسة والماء أحدهما محلّ الآخر في دورات من التغيّرات، تطوّرت من بداية بسيطة جداً، عبر عملية الانتخاب التدريجي لتغيّرات متناهية الصغر، أشكال لانهائية غاية في الجمال والروعة.

عدَّل داروِن كلمات قليلة عام 1844، لكن التغيرات الكبرى حدثت في أثناء إعداد «أصل الأنواع» للنشر عام 1859. حذف داروِن الإشارة إلى «عملية الانتخاب التدريجي لتغيّرات متناهية الصغر»، وكثّف التعابير الأخرى بحيث سهَّلت النص وأعطته إيقاعاً شعرياً.

انتقيتُ أربع كلمات ظلت كما هي دون تغيير خلال كل النسخ والطبعات: «أشكال لانهائية غاية في الجمال» بمثابة إلهام لهذا الكتاب وثيمة لهذا الفصل الختامي. وهذا التعبير يلخص جوهر علم الإيفوديفو

الجديد. سأناقش هنا كيف تزيدُ اكتشافات الإيفوديفو ومنظوراته فخامة التصوّر التطوّري للحياة، وكيف وسّعت أساسات الفكر التطوّري وعمقتها، وكيف أغنت فهمنا للكيفية التي تطوّرت بها أشكال داروِن اللانهائية، ولا تزال.

أخبرني الناشر أنني لن أحظى بعشرين سنة لأجد الكلمات المناسبة، وأنه لا ينبغي لي أن أطمح لالتقاط جوهر الحقل الجديد بطريقة نثر داروِن البارعة، ومع ذلك سأحاول أن أستخلص وأستنتج أربع نقاط رئيسية عن تأثير الإيفوديفو وأهميته:

أولاً، أؤكدُ أن الإيفوديفو يكوِّن المرحلة الثالثة الكبرى في التركيب التطوّري المستمر. لم يكتف الإيفوديفو بتوفير قطعة مهمة ناقصة في «النظرية التركيبية الحديثة -علم الأجنة -بل دمجها بعلم الجينات الجزيئية وبالعلوم التقليدية كعلم الأحافير. إن الطبيعة المدهشة لبعض اكتشافاته المحورية، وعمق أدلته التي وفرها لحل أسئلة مستعصية وجودتها غير المسبوقة يمنحان علم الإيفوديفو سمة ثورية.

ثانياً، يوفر الإيفوديفو وسيلة جديدة لتدريس المبادئ التطوّرية في إطار أكثر فعالية. فعبر التركيز على قصص تطوّر الشكل، وتوضيح كيف أن التغيّرات في النموّ والجينات هي أساس التطوّر، تَظْهَرُ المبادئ العميقة الكامنة خلف وحدة الحياة وتنوّعها. أيضًا، توفّر الأشكال المرئية لأنماط النشاط الجيني في الأجنة، والجرد الدقيق لمجموعات عُدَد الأدوات الجينية في الأنواع المختلفة، طرقاً ذات فعالية أكبر في تمثيل المفاهيم التطوّرية من المقاربات التجريدية السابقة.

ثالثاً، لأن الإيفوديفو يكشف ويوضح العملية التطوّرية ومبادئها

بطرق ملموسة، فلديه دور محوري يؤدّيه في الجبهة الأمامية للصراع الاجتماعي حول تعليم الأحياء التطوّرية.

وأخيراً، إن أهمية علم الأحياء التطوّرية أكبر بكثير من كونه مجرد فلسفة. إنَّ مصير الأشكال اللانهائية للطبيعة، بما في ذلك الإنسان، يعتمد على فهم أوسع لتأثير الإنسان على التطوّر.

الإيفوديفو كحجر زاوية لنظرية تركيبية أحدث

علم الأجنة بالنسبة لي هو إلى حدّ بعيد أقوى أنواع الحقائق التي تدعم تغيّر الأشكال، ولا أعتقد أن أحداً ممن عقّبوا علي قد أشار إلى هذا.

-تشارلز دارون، رسالة إلى أسا جري (Asa Gray)
10 سبتمبر، 1860

الاقتباس بالأعلى يعكس أن علم الأجنّة كان على الدوام مكوّناً مكمّلاً للتدليل على التطوّر ومبدأ الأصل المشترك. وكان التحدي طوال أكثر من 100 سنة بعد دارون هو شرح كيفية تغيّر الأجنّة، وبالتالي الأشكال البالغة التي تنتجها. أضافت النظرية التركيبية الحديثة علم الجينات للصرح التطوّري، لكن علماء جينات تلك الفترة كانوا مقيّدين إلى حدّ كبير بدراسة التفاوتات الصغيرة داخل النوع ولم يعلموا الطبيعة الكيميائية للجين (الدنا على سبيل المثال)، ناهيك عن كيفية تأثير الجينات في الشكل. كان الإنجاز الأكبر للنظرية التركيبية الحديثة هو التوفيق بين

الرؤية الأحفورية لما يسمى «التطوّر الكلي» (وهو التطوّر على مستوى الأنواع) والرؤية الجينية «للتطوّر الجزئي» (وهو التفاوت المرصود في النوع). أكَّدَت التركيبية أن التغيّرات واسعة النطاق في الشكل كما تُرى في السجل الأحفوري يمكن أن تُشرح عبر الانتخاب الطبيعي لتغيّرات جينية صغيرة خلال فترات طويلة من الزمن لتنتج تفاوتاً داخل النوع. كان ذلك استنباطاً دُعِمَ بإجماع الآراء، لكن لم يعلم أحد إن كانت الآليات الجينية التي تحكم التغيّر واسع النطاق هي نفسها التي تحكم التفاوت داخل النوع أم أنها مختلفة. لم يُعلم أي شيء عن كيفية تأثير الجينات في الشكل، أو أيّها يؤثر في تطوّره، أو عن أنواع التغيّرات الجينية المسؤولة عن التطوّر. أيضاً، حالما فُهمت بنى الدنا والبروتينات، صارت الرؤية السائدة لدى معماريِّي النظرية التركيبية الحديثة وأنصارها هي أن عملية الطفرات العشوائية والانتخاب ستغيّر سلاسل الدنا والبروتينات بحيث أن الأنواع ذات القرابة الكبيرة فقط ستحمل جينات متناددة.

جميع ما وصفته في الفصول الثالث إلى العاشر اكتُشف في العشرين سنة الماضية تقريباً. إن الرؤى التي قدمتها هذه الاكتشافات لم تملأ فقط الفجوة الواسعة في فهمنا للعمليات التطوّرية، لكنها أجبرت علماء الأحياء أيضًا على إعادة التفكير بشكل كامل في تصوّرهم لكيفية تطوّر الأشكال. لقد قرأتَ عن دليلٍ تفصيلي للكيفية التي صاغ بها اختلافُ طريقة استخدام جينات عدة الأدوات الغابرة تطورَ الأشكال الحيوانية من ثنائي الجانب البدائي إلى *الإنسان العاقل*. سألخص هنا كيف وُسِّعت الأفكار التطوّرية الكبرى أو أضيئت أو أعيد النظر فيها بناء على مجموعة الأدلة الجديدة.

حول التحدر مع التعديل

أدوات صناعة المملكة غابرة

أول اكتشافات الإيفوديفو وربما أكثرها إذهالاً هو الأصل الغابر لجينات بناء جميع أنواع الحيوانات (الفصلان 3 و6). إن حقيقة أن أنواع الحيوانات المختلفة قد شُكِّلتْ بواسطة مجموعات متشابهة جداً من بروتينات عدّة الأدوات كانت غير متوقّعة تماماً. إن ما تمخضت عنه هذه الاكتشافات الثورية عظيم وينطوي على عدة نتائج.

الأولى، أنها وفّرت دليلاً عميقاً وجديداً كلياً لأحد أهم أفكار دارون وهي أن جميع الأشكال تتحدّر من سلف مشترك واحد (أو بضعة أسلاف). تُظهر عُدّة الأدوات الجينية المشتركة الخاصة بالنموّ ارتباطات عميقة بين المجموعات الحيوانية، وهي ارتباطات لم تكن مفهومة بتاتاً بسبب أشكال الحيوانات المختلفة كثيراً.

الثانية، اكتشاف أن الأعضاء والبنى التي اعتُبرت لفترة طويلة ابتكارات متناظرة مستقلة في الحيوانات المختلفة كالعيون والقلوب والأطراف تمتلك مكوّنات جينية مشتركة تتحكّم بتشكيلها، أَجبرنا على تعديل كلي لتصوّرنا لكيفية نشوء البنى المعقّدة. وعوضاً عن إعادة اختراعها من الصفر باستمرار فإن كل عين أو طرف أو قلب قد تطوّر عبر تعديل بعض شبكات التحكّم الغابرة وفقاً لأوامر الجين أو الجينات الحاكمة ذاتها (الفصل 3). ترجع أجزاء هذه الشبكات للسلف المشترك الأخير لثنائيات الجانب (ثنائي الجانب البدائي) ولأشكال أقدم (الفصل 6).

الثالثة، يُظهرُ التاريخ العميق لعُدّة الأدوات أن اختراع هذه الجينات لم يكن الفتيل الذي أشعل التطوّر. لقد سبقتْ عدةُ أدوات ثنائي الجانب العصرَ الكامبري (الفصل 6)، وسبقتْ عدةُ أدوات الثدييات تنوّعَ الثدييات السريع في العصر الثالث (Tertiary period)، وسبقتْ عدةُ أدوات الإنسان القردة والرئيسيات الأخرى بفترة طويلة (الفصل 10). يتضح أنَّ الجينات بحد ذاتها لم تكن «محرّكات» التطوّر. تمثّل عدة الأدوات الجينية الاحتمالية، أما تحقيقها فرهنٌ بالبيئة.

حول التعقيد والتنوّع

تمتلك النزعات واسعة النطاق في تصميم الحيوان والتطوّر أساساً مشتركاً، وتُمكّنُ عبر خصائص «المادة المظلمة» في الجينوم

ركّزتُ كثيراً في هذا الكتاب على أن الحيوانات مركّبة مدولياً من أجزاء مكرّرة تسلسلياً، وعلى نزعة التطوّر نحو منح هذه الأجزاء تخصّصية أكبر (الفصل 1). إن المدولية هي مفتاح بناء التعقيد وتطوّر التنوّع. أما التعقيد في الحيوانات فيتمثّل في عدد أنواع أجزاء الجسم المختلفة (الخلايا، الأعضاء، الزوائد). وقد ازداد التعقيد مع الوقت وفي مجموعات معيّنة عبر تخصّصية الأجزاء المكرّرة، وعبر نشوء أنواع جديدة من الأجزاء. إن تعاظم التعقيد في المفصليات والفقاريات حدث بطرق متماثلة تقريباً. فقد رأينا أنَّ انتشار جينات *Hox* مختلفة في البنى المكرّرة تسلسلياً مَايزَ بين أشكال ووظائف هذه البنى في مفصليات الأرجل والفقاريات. إن نجاح هاتين المجموعتين قد مُكّن بفضل مرونة الأنظمة التي تتحكم

في انتشار جينات *Hox* بحيث أن البنى المفردة تستطيع التطوّر مستقلة بعضها عن بعض.

يستمدّ الفهم العميق للكيفية التي تتحقّق بها هذه الاستقلالية وبالتالي التعقيد والتنوّع من خلال إدراكنا خصائص المفاتيح الجينية (الفصل 5). ولأن الجين الواحد يمكن أن يُدار، بل يُدار فعلاً، بواسطة عدد هائل من المفاتيح المستقلة، فإن الطفرات في مفتاح واحد يمكن أن تنتخب بطريقة لا تؤثر على المفاتيح الأخرى أو على وظيفة البروتين المشفّر بواسطة جين ما. إن التغيّرات التطوّرية في المفاتيح مسؤولة عن إزاحة مناطق جينات *Hox* الكامنة وراء الاختلافات واسعة النطاق في تعضية أجسام حيوانات عديدة (الفصل 6)، ومسؤولة عن الاختلافات الأصغر في مظهر البنية الواحدة في الحيوانات المختلفة (الفصلان 7 و8)، وعن نشوء عناصر النمط الجديدة وتعديلها (الفصل 8). إن الطريق إلى فهم صناعة الأشكال «اللانهائية» (أي التنوّع) هو العدد الفلكي للتوافقيات الممكنة للمفاتيح والمدخلات التنظيمية. تدمجُ المفاتيح مدخلاتٍ مرتبطة بالأبعاد الثلاثة، ونوع الخلية والنسيج، وتوقيت النموّ النسبي. يمكن أن يُعدَّل أيّ من هذه المتغيرات عبر إضافة أو طرح أو تشذيب المدخلات في المفاتيح. كذلك يمكن أن يتوسّع أو يتقلّص عدد المفاتيح خلال التطوّر، وحتى مع عدد محدود من بروتينات عدة الأدوات التي تؤثر في المفاتيح فإن القدرة التوافقية هائلة.

إن تحويل هذه القدرة إلى واقع يتم دون ريب بواسطة الانتخاب الطبيعي. ورغم أن الطرق لا تُستكشف جميعها، والأنماط لا تصنع كلها إلا أننا نَسْعدُ بوجود ما يقارب 17 ألف من الأنماط التي ما زالت

مبثوثة على أجنحة الفراش، وبالتنوّع العظيم في أحجام وهيئات وأنواع العلامات على نظرائها من الثدييات، وبهندسة أجسام الحيوانات البحرية وأصدافها، وبالـ 300 ألف نوع أو أكثر من الخنافس. لقد قُدِّر أن ملايين أنواع الحيوانات الحية الآن لا تمثل أكثر من نحو 1٪ من المليار شكل أو أكثر التي تطوّرت خلال الـ 500 مليون سنة السابقة. كما نعلمُ عن وجود مجموعات متنوعة كثيرة اختفت منذ وقت بعيد مثل الديناصورات وثلاثيات الفصوص والعديد من الحيوانات الكامبرية المدهشة والغريبة وأكثر من دزينة من الأناسن. إن هذا التعقيد والتنوّع قد أنتجته القدرة التوافقية لعُدّة الأدوات الجينية وهي تعمل على مجموعات هائلة من المفاتيح الجينية.

حول الابتكار

الجينات والأبنية القائمة توفر طرقاً للابتكار

لقد رأينا أن الحشرات والتيروصورات والطيور والخفافيش لم تخترع جينات «الجناح» (الفصل 7)، والفراش لم يخترع جين «البقع» (الفصل 8)، ولا الإنسان اخترع جين «الكلام» أو «ثنائية القدمين» (الفصل 10). بل كان الابتكار في جميع هذه المجموعات مسألة تعديل البنى القائمة وتعليم الجينات القديمة حيلاً جديدة.

إن مفتاح الابتكار على المستوى الجيني هو التعدّدية الوظيفية التي تسم جينات عُدّة الأدوات. يرجع التعدّد الوظيفي لجينات عُدّة الأدوات إلى انتشارها في أوقات وأماكن مختلفة بواسطة مجموعات من

المفاتيح الجينية. بهذه الطريقة يستطيع بروتين انعدام الأطراف القاصية *Dll* الدفع بتشكيل الطرف في وقت معين، بينما يدفع بنمو العُيينة في وقت آخر. إن البروتين ذاته يصنع في كلا الوقتين، لذلك فإن اختلاف الوظيفة ناجم عن تأثيره في مفاتيح مختلفة في هذين السياقين المختلفين.

على المستوى التشريحي كانت التعدّدية الوظيفية والحشو مفاتيحَ فهم التحوّلات التطوّرية في البنى. رأينا هذا وخاصة في مفصليات الأرجل، حيث أن انتقال وظيفة ما مثل التغذية إلى إحدى مجموعات الزوائد قد حرّرت زوائدَ أخرى لتصبح متخصصة في المشي أو السباحة أو أنشطة أخرى. وبطريقة مشابهة عُدِّلتْ تفرعات الخياشيم في أسلاف مفصليات الأرجل المائية لتكون خياشيم كتابية ورئات كتابية، وقصبات هوائية أنبوبية، ومغازل، وأجنحة.

كشف الإيفوديفو عن الاستمرارية التي كانت محجوبة بين الأشكال أو اكتنفها غموض بناء على المظهر فقط. فعبر الكشف عن تشابهات النموّ بين البنى قدَّم دليلاً تحلّى بجدة وموضوعية أكبر من المقارنات القائمة على المظهر فقط. تدعم هذه التأملات حول تطور الابتكار جوانبَ من أفكار داروِن الأصلية التي استعصى فهمها على البعض.

وكذلك يرسمُ تاريخ هذه البنى كيف تتطوّر «الأشكال اللانهائية» عبر دورات من الابتكار والتوسع، فتُمهد الأبنية الجديدة طرقاً جديدة للحياة. أدى ظهور جناح الحشرة إلى تطوّر اليعاسيب وذبابات النوار والفراش والخنافس والبراغيث والذباب وغيرها. وقد توسّعت هذه المجموعات بدورها مُحفَّزَة بدورات من الابتكار والتوسع عبر إضفاء تعديلات على الأجنحة أو مخطّط الجسم كأنظمة تلوين الحراشف في

العثّ والفراش، والغطاء الصلب في الخنافس، والأجنحة الخلفية المتطوّرة المستخدمة في التوازن عند الذباب.

لماذا تكون أجزاء الجسم وجيناته الناجزة المسار الأكثر ازدحاماً نحو الابتكار؟ إنها مسألة احتمالات. إن احتمال ظهور التنوّع في البنى والجينات القائمة أكبر من ظهور بنى أو جينات جديدة، وعليه فإن هذا التنوّع هو الأكثر توافراً ليؤثر فيه الانتخاب. وكما شرح فرانسوا جاكوب ببلاغة: تعمل الطبيعة كسمكري يستخدم المواد المتاحة، لا كمهندس يصمّم. ابتكار الأجنحة لم يكن أبداً من الصفر، ولكن عبر تعديل تفرّعات الخياشيم (كما في الحشرات) أو تعديل الأطراف الأمامية (ثلاث مرات). إن النزعات التطوّرية تسلك الطُرق الأكثر توافراً وبالتالي تصبح هذه المسارات المسارات الأكثر ازدحاماً.

كشف الإيفوديفو أن باستطاعة التطوّر تكرار نفسه، بل إنه يفعل ذلك على مستويات البنى والأنماط، وعلى مستوى الجينات المفردة. إنْ سلك التطوّر الطريقَ الأكثر احتمالاً، عبر البنى والجينات القائمة، فإن الأنواع المختلفة قد تتبع الطريق ذاته للتكيّف عندما تواجه بضغوط انتخابية متشابهة. لقد رأينا ذلك في تطوّر زوائد التغذية في القشريات (الفصل 6)، وفي تقلّص أشواك الحوض في سمكة أبو شوكة (الفصل 7)، وفي حالات أخرى تقلّص فيها الطرف في الفقاريات. رأينا أيضًا أن الفراء الداكن وأنماط الريش يمكن أن تنشأ عبر طفرات في ذات الجين في الأنواع المختلفة، بل حتى في نفس الموقع في ذلك الجين (الفصل 9).

تعالجُ أمثلةُ «تكرار التطوّر لنفسه» الصعوبات التي واجهها البعض

في فهم دور الطفرات العشوائية في العملية التطوّرية. استصعب البعض تخيّل كيف يمكن للابتكار والتعقيد أن ينشأا من «عملية عشوائية». الفرق الرئيسي هو أنه بينما يكون توليد التفاوت الجيني بواسطة الطفرة عملية عشوائية تماماً، إلاّ أنَّ فرز هذه التفاوتات، أي تحديد تلك التي ستستمر وتلك التي ستُنبذ، يُحّدَدُ عبر عملية انتخابية جبّارة لاعشوائية. تخضعُ جميع القواعد في جينوم الحيوان، وعددها مئات الملايين إلى المليارات حسب النوع، بتساوٍ لأخطاء نسخ عشوائية أو لتلف فيزيائي يسبب الطفرات، لكن من كل الطفرات الممكنة يستطيع جزء صغير فقط تغيير فراء ثديي بأسلوب مرئي أو تقليص أشواك سمكة أبو شوكة دون التسبّب بتلف كارثي مُصاحب. وخلال الدهور الطويلة ستظهر مثل هذه الطفرات في الجماعات الكبيرة من الحيوانات ببساطة كونها مسألة احتمالات، وعندما تحدث فإن الانتخاب الإيجابي للصفة الواقعة تحت تأثيره سيجعلها تنتشر في الجماعات مع الوقت.

ولقد التقط جاك مونو هذا التفاعل بين العشوائية والانتخاب الموجود في التطوّر ببلاغة بارعة في عنوان كتابه البارز [الفرصة والضرورة] *Chance and Necessity* (كإشارة للفيلسوف اليوناني ديموقريطس الذي قال: «كل ما هو قائم في الكون ثمرة الفرصة والضرورة»). إن التطوّر بكل تأكيد هو مسألة حصول الفرصة، لكن خلال عمليات السحب على هذا اليانصيب العشوائي تحقّق بعض الأرقام والتوافقيات حتميات الضرورة البيئية ويتم انتخابها ثم يعاد انتخابها مراراً.

رأينا أيضاً في فئران الجيب المتوسطة أن النوع الحيواني يمكن أن يطرُق مسارات مختلفة للوصول إلى الحل ذاته. وبينما طوّرت التيروصورات

والطيور والخفافيش أطرافها الأمامية إلى أجنحة، فإنها فعلت ذلك بطرق مختلفة كلياً. لقد انتُخبت احتياجات وفرصٌ بيئية متشابهة لتحقيق تكيّفاتٍ بيئية متشابهة، لكن هذه الحلول التي تنفّذ في مرحلة النموّ تتفاوت في التفاصيل أحياناً.

عبر الكشف عن الآليات النمائية والجينية الكامنة وراء التغيّر يسمح لنا الإيفوديفو بمقابلة ومقارنة المسارات التطوّرية لمجموعات مختلفة. إن الألغاز القائمة منذ فترة طويلة مثل محاكاة بيتس في الفراش، والسفع في العثّ، وحتى تطوّر حجم منقار العصافير ومظهره هي الآن في متناول يدنا. وقريباً ستكون بحوزتنا صُورٌ مفصّلة للعديد من الأمثلة الكلاسيكية للانتخاب الطبيعي وسنفهم بعمق كيف ينشأ التفاوت وكيف يُنتخب.

حول التطوّر الجزئي والتطوّر الكلي

ما ينطبق على النوع ينطبق على المملكة

وحّد معماريو النظرية التركيبية الحديثة حقولاً تطوّرية عبر التأكيد على أن العمليات التي شُغّلت على مستوى الأفراد في الجماعات والأنواع كانت كافية لتُعلِّل الاختلافات العظيمة التي تطوّرت عبر الزمن الجيولوجي. لو كان الحال كما اقترح البعض في أوقات مختلفة خلال القرن المنصرم أنَّ التغيّرات في الشكل ناجمة عن طفرات خاصة ونادرة جداً، مثل تلك الطفرات التي تغيّر جينَ نحتٍ بطريقة معيّنة فقط، فإن هذا الاستنباط لن يكون مُبرراً. لقد لبِثَ شبح «الوحش الواعد» نصف

قرن منذ ظهور النظرية التركيبية الحديثة؛ إلاَّ أنَّ حقائق الإيفوديفو بدّدته.

تطورُ الجينات الناحتة والصفات التي تتحكم بها كان مهماً جداً، لكنه لم يحدث من خلال وسائل مختلفة عن الطفرات والتفاوتات التي تظهر عادة في الجماعات. إنَّ حفظ جينات *Hox* وجينات عدّة الأدوات الأخرى أكثر من 500 مليون سنة يصوّر أنَّ الضغط للمحافظة على هذه البروتينات كان بشكل عام عظيماً كالذي أدَّى للمحافظة على أية فئة أخرى من الجزيئات. وعوضاً عن تغييرها فقد تحقّق تطوّر الشكل من خلال التعديل التطوّري على المفاتيح، من مفاتيح جينات *Hox* الحاكمة إلى مفاتيح إنزيمات الصبغ البسيطة. تُوضِّحُ استمرارية عدة الأدوات واستمرارية البنى خلال أغلب العصور أننا لا نحتاج إلى استدعاء آليات خاصة أو نادرة جداً لتفسير التغيّر واسع النطاق. إنَّ الاستنباط من التفاوت الصغير إلى التطور واسع النطاق مبرر بشكل جيد. وبلغة تطوّرية فإن الإيفوديفو يُظهِرُ بشكل واضح جلي أنَّ التطوّر الكلي هو صنيعة التطوّر الجزئي.

الإيفوديفو وتدريس التطوّر

لا أعرف الكثير عن التاريخ
لا أعرف الكثير عن الأحياء
لا أعرف الكثير عن كتب العلم

– سام كوك (Sam Cooke) وهيرب ألبرت (Herb Alpert) ولُو أدلر (Lou Adler) Wonderful World (1960) [عالم مدهش]

يواجه تدريس التطوّر تحديين اثنين: الأول: هو أنه موضوع كبير مُتنامٍ يضم عدة حقول، الثاني: أنه يواجه معارضة قوية، وخصوصاً في الولايات المتحدة، من قبل بعض (وليس كل) التيارات الدينية. سوف أحدِّدُ أولاً المساهمة الإضافية التي يستطيع الإيفوديفو تقديمها لتنمية الوعي العام للتحدّي الأول، ثم مسألة المعارضة لاحقاً.

عموماً إنّ الفهم العام للتطوّر في الولايات المتحدة مخزٍ بشكل استثنائي. ففي مسح لمواطني 21 دولة أو منطقة متعلق بالمعرفة العلمية والبيئية العامة أحرزت الولايات المتحدة المركز الأخير في السؤال عن تطوّر الإنسان. عندما طُلب من مواطني الدول المختلفة الإجابة عن السؤال: «ما مقدار صحة هذا برأيك: نما الإنسان من أنواع سابقة من الحيوانات؟» مستخدمين مقياساً من أربع نقاط حيث مثّل 1 قطعاً صحيح، 2 ربما صحيح، 3 ربما ليس صحيحاً، و4 قطعاً ليس صحيحاً، كانت إجابات المواطنين الصحيحة في مختلف البلدان كالتالي:

المرتبة	البلد	الوسط
1	ألمانيا الشرقية	1.86
2	اليابان	1.89
3	جمهورية التشيك	2.04
4	ألمانيا الغربية	2.08
5	بريطانيا لعظمى	2.18
6	بلغاريا	2.28
7	النرويج	2.43
8	كندا	2.45

9	إسبانيا	2.45
10	هنغاريا	2.50
11	إيطاليا	2.51
12	سلوفينيا	2.51
13	نيوزيلندا	2.54
14	إسرائيل	2.66
15	هولندا	2.67
16	إيرلندا	2.70
17	الفلبين	2.75
18	روسيا	2.80
19	إيرلندا الشمالية	2.99
20	بولندا	3.06
21	الولايات المتحدة	3.22

إذا نظرنا إلى الجانب المشرق، فكل ما يمكن للولايات المتحدة فعله هو التحرّك للأعلى فقط.

في مسح آخر أجراه مجلس العلوم الوطني عام 1996 حول مقدار صحة العبارة التالية: «عاش أوائل الناس في زمن الديناصورات». أجاب 52٪ من الأمريكيين المستطلعين بأنهم يوافقون (32٪) على صحة العبارة، أو أنهم لا يعلمون مقدار صحتها (20٪).

سجلّت هذه الواقعة نقطتين للمسلسل الكرتوني فلينستونز[1] مقابل صفر لداروين وهكسلي والنظام التعليمي لأغنى دول العالم وأكثرها قوة وأكثرها هوساً بالتكنولوجيا.

(1) ذا فلينستونز (The Flintstones) مسلسل كرتوني أمريكي يصوّر حياة عائلة في العصر الحجري تعيش بجوار الديناصورات. المترجمان

فضيحة هذا الجهل مساوية في نظري لعدم معرفة تاريخ إنشاء الولايات المتحدة ومحتوى دستورها أو جذور الحضارة الغربية. تعتبر هذه المعرفة ثقافة أساسية، وقد دُرِّست وأعيد تدريسها في صفوف دراسية مختلفة، وينطبق هذا على الأحياء وعلوم الأرض التي يجب أن يوفّر لها التطوّر الإطار الأساسي. وحتى ذلك تبقى الإحصائيات مخيفة جداً.

الوضع سيئ بما فيه الكفاية، وتعكسه أرقام أخرى حول ثقافة المجتمع في العلوم والرياضيات بحيث أن اللوم يمكن أن تتشاركه عدّة جهات. هناك عدد كبير من المنظمات والكتب التي تدرس مشكلة الأمية العلمية وأسبابها. لن أدخل في التفاصيل هنا. المخرج الوحيد عبر التعليم. أفضّلُ التركيز على ما يمكن أن يفعله علماء الأحياء وحلفاؤهم في كل مستويات مهنة التعليم لتحسين الوضع، وخصوصاً بالنسبة للتطوّر.

يجب أن نؤكّد دائماً على أنّ التطوّر أكثر من مجرد موضوع في علم الأحياء. إنه أساس المبحث بأكمله. فعلم الأحياء من دون التطوّر مثل الفيزياء من دون الجاذبية. وكما أننا لا نستطيع شرح بناء الكون ومدارات الكواكب والقمر أو المدّ والجزر اعتماداً على مجموعة قياسات متفرّقة، فإننا لا نستطيع شرح بيولوجيا الإنسان أو التنوّع الأحيائي للأرض عبر ملخص يحوي آلاف الحقائق الصغيرة. ولذلك فإن جميع الفصول والكتب التأسيسية يجب أن تتوحّد حول التطوّر باعتباره ثيمة مركزية.

بالنسبة للمحتوى العلمي الذي ينبغي تدريسه، لدى الإيفوديفو الكثير من الجديد والجليّ والمقنع ليقدّمه. فمنذ النظرية التركيبية الحديثة، ركّزت معظم شروحات العمليات التطوّرية على آليات التطوّر الجزئي.

تعلّم ملايين من طلبة علم الأحياء وجهة النظر (من علم جينات الجماعات) أن «التطور تغيّرٌ في التواترات الجينية[1] (gene frequencies)». إنها ثيمة بالغة الإلهام، أليس كذلك؟ تجعل هذه الرؤية للجينات أوصافاً تجريدية وتدفعُ شرح التطوّر باتجاه الرياضيات بعيداً عن الفراش والحمر الوحشية أو أنسن الجنوب العفري وإنسان نياندرتال.

تطوّر الشكل هو الحبكة الرئيسية لقصة الحياة، سواء الموجودة في السجل الأحفوري أو في تنوّع الأنواع الحية. دعونا إذاً نُدرِّس هذه القصة. عوضاً عن «تغير في تواترات الجينات» دعونا نقول «تطوّر الشكل هو تغيّر في النموّ». بالطبع هذا رجوع لعصر دارون وهكسلي حينما لعب علم الأجنة دوراً محورياً في تطوّر الفكر التطوّري بأكمله. هناك ميزات متعددة للمقاربة الجنينية لتدريس التطوّر:

أولها، إنّ بناء التعقيد في جيل واحد من بيضة إلى حيوان بالغ لا يتطلب جهداً كبيراً في التفكير لرؤية كيف أن تغيّرات مستمرة في عملية النمو، تراكمت خلال فترات زمنية طويلة، تستطيع إنتاج أشكالٍ متزايدة التنوّع.

ثانياً، نمتلك الآن فهماً راسخاً لكيف يتم التحكّم بالنمو. يمكننا أن نشرح كيف تصوغ بروتينات عُدّة الأدوات الشكل، وأن جينات عُدّة الأدوات هذه مشتركة بين جميع الحيوانات، وأن الاختلافات في الشكل تنشأ من تغيير طريقة استخدامها. إن مبدأ «التحدّر مع التعديل» (الذي يحدث في النموّ) واضح وضوح الشمس.

---

(1) التواترات الجينية: نسبة نسخة معينة (أليل allele) من جين ما مقارنة بباقي النسخ في المجموعة. المترجمان

ثالثاً، الميزة العملية الكبيرة هي الطبيعة المرئية لمنظور الإيفوديفو. المثل الصيني الذي ذكرته في الفصل الرابع «رؤية شيء مرة واحدة خير من السماع عنه مائة مرة» هو مذهب تعليمي متين. نتعلم أكثر عبر ربط المرئي بالمقروء. دعونا نُري الطلبة أجنّة وعناقيد *Hox* وأشرطة ورقطاً وكل بهاء صناعة شكل الحيوان. المفاهيم التطوّرية ستتبعها تلقائياً.

الميزة الرابعة لهذه المقاربة هي أنها تقرّب علم الجينات أكثر إلى الحجج القوية التي يوفّرها علم الأحافير. إنَّ الديناصورات وثلاثيات الفصوص هي منتجات شهيرة للتطوّر، وتلهم معظم من يلمسها. وعبر وضع عجائب الزمن الغابر هذه في موقعها من استمرارية الأشكال منذ العصر الكامبري حتى الحاضر فإن تاريخ الحياة يغدو محسوساً أكثر. سيصبح العالم مدهشاً حقاً لو أنَّ كل طالبٍ داوم على الاتصال ببعض الأحافير في فصله.

دعوني أعرض اقتراحين عامين آخرين. لعل أفضل أوصاف الانتخاب الطبيعي هو أنه «قصة متقنة» من التكيّفات. تغيّرت مناقير عصافير الشرشوريات بسبب نوع الغذاء المتاح، وغدا العثّ أكثر دكنة بسبب التلوث، إلخ. لكنني لا أعتقد أن القوة التي تمتلكها الزيادات الصغيرة في الانتخاب التي تراكمت خلال مئات أو آلاف الأجيال يتم تدريسها على نحو واسع. إن العبارة المكرّرة عادة «البقاء للأصلح» تشير ضمناً إلى لعبة المصارعة أكثر من إشارتها إلى القوى الدقيقة للانتخاب المؤثّرة على الاختلافات الصغيرة جداً في الخصوبة والبقاء العام. إنَّ انتشار الطفرات المفضلة في المجموعات يمكن أن يُحاكى ويُرسم بسهولة، وهو يؤكد البعد الزمني للتطوّر.

أخيراً، ينبغي أن تكون الرؤية التطوّرية للحياة متطلباً أساسياً للدرجة الجامعية كمبادئ علم النفس أو الحضارة الغربية. لكن عوضاً عن تكليف الطلبة بحفظ واجترار جبالٍ من الحقائق العلمية، ينبغي أن نؤكد على دراسة تاريخ اكتشاف التطوّر، وسماته وأفكاره الكبرى، وأدلته الأساسية. سيكون لذلك فائدة أكثر بكثير في توعية المواطنين وإعداد المعلّمين مقارنة بدفع الطلبة لتذكر الأسماء اللاتينية للأصنوفات. إننا نذيق أطفالنا مرارة الحفظ والاجترار ليكتووا بنار الملل وتفوتهم الصورة الكبرى، ولو عُرض التطوّر كقصة ذات حبكات فستستحوذ على اهتمام الطالب.

في الولايات المتحدة خاصةً توجد عقبة أخرى إضافة لمحتوى المعرفة التطوّرية وطرق تعليمها، سأتحدث عنها في الصفحات التالية كما وعدتكم. ولكن حتى من دون وجود هذه المعارضة النشطة التي تجابه التطوّر نستطيع العمل بطريقة أفضل، بل يجب علينا ذلك.

الإيفوديفو وصراع التطوّر والخلق

يجب أن تتخذ موقفاً إن اقتنعت بأمر ما،
وإلاّ فإنك لا تستحقُ النجاح.

-يوهان ولفجانج فون جوته
[البروبيليا] **(1798)** ***Propylaea***

في أثناء الوقت القصير بين الطبعتين الأولى والثانية لكتاب «أصل الأنواع» أدخل دارون ثلاث كلمات إضافية إلى الفقرة الختامية الشهيرة مضيفاً «الخالق» ليعيد كتابة الجملة كالتالي: «التى نفثها الخلقُ أصلاً في أشكال محدودة أو في شكل...». عبّر دارون لاحقاً عن الندم لفعل ذلك في رسالة لعالم النبات ج. د. هوكر (J. D. Hooker): «لكنني ندمتُ منذ فترة طويلة لأنني خضعتُ للرأي العام، واستخدمتُ المصطلح التوراتي للخلق، والذي قصدتُ به (ظهرت) عبر عملية مجهولة تماماً».

إنّ إدخال تلك الكلمات كان مقصوداً به استرضاء النقّاد وجعل أفكار دارون التطوّرية أكثر قبولاً، وقد أشعلت بكل تأكيد تخمينات كثيرة حول حقيقة أفكار دارون الدينية. للبعض كان غصن الزيتون هذا بالإضافة إلى تحفّظ دارون في الكشف عن معتقداته (التي كُشفتْ لحد ما في مراسلات خاصة وفي كراريس غير منشورة فقط) الأساسَ للمصالحة والتوافق بين التطوّر والدين.

استشعر كثير من العلماء ومجموعة عريضة من الطوائف الدينية ذلك التوافق. على سبيل المثال كرّر البابا يوحنا بولس الثاني عام 1996 الموقف الكاثوليكي بأن جسد الإنسان قد تطوّر وفق عمليات طبيعية. قال أيضًا إن الدليل على التطوّر قد عَظُمَ كثيراً للنقطة التي غدا فيها «أكثر من مجرد نظرية». (بينما كان إقرار البابا أقوى من أسلافه، فإنه كان يكرّر موقف الكنيسة الرومانية الكاثوليكية المعروف منذ فترة طويلة. لقد عرفني المدرّسون المرسَّمون كنسياً في ثانوية القديس فرانسيس دي سال في توليدو إلى دارون والتطوّر). كانت بيانات البابا الآتية من رأس أكبر عقيدة مسيحية في العالم وصاحبة تاريخ مشهور ببطئه في تقبّل التقدّم

العلمي تأذن أخيراً بنقطة تحوّل في صراع التطوّر الطويل للحصول على القبول. لكن بينما قبلت بعض الطوائف صراحة حقيقة التطوّر الأحيائي، ظلَّ الأصوليون الذين يصرّون على القراءة الحرفية للكتاب المقدس (أشير إليهم هنا بدعاة الخلق) معارضين صلبين للعلم التطوّري ويروّجون بشدة لقانون يرمي لتعطيل تدريس التطوّر في المدارس العامة.

قال جوته أيضًا: «لا أسوأ من جهل نشط»، وإنها أجندة هذه الأرواح الضائعة التي يجب أن تتصدّى لها الجماعات العلمية والتعليمية. أريد أن أكون واضحاً جداً في موقفي. أعتقد أن تدريس التطوّر والعلم يُخدم بالطريقة المثلى عبر ترويج المنهج العلمي والمعرفة العلمية وليس عبر مهاجمة الأفكار الدينية. إنّ الأسلوب الأخير عقيم، ويفضي إلى نتائج عكسية. وأرى أيضًا، كما استنتجتْ العديد من الطوائف الدينية، أن الدين يُخدم بالطريقة المثلى عبر ترقية تعاليمه وعقائده وتطويرها، وليس عبر مهاجمة العلم التي هي قطعاً استراتيجية خاسرة.

كتب تشارلز هاربر (Charles Harper) المدير التنفيذي لمؤسسة جون تمبلتون (John Templeton Foundation)، وهي منظمة مهتمة بالعلاقة بين اللاهوت والعلم، مؤخراً في المجلة العلمية الرائدة نيتشر (*Nature*):

> كلما نمت المعرفة العلمية، فإن المواقف الدينية المستندة إلى «فجوات» في التصوّر العلمي سوف تتقلّص إلى أن تضمحل تماماً حالما تغلق هذه الفجوات. هؤلاء المسيحيون الذين يحاربون التطوّر الآن سيأخذونه على محمل الجد آخر الأمر.

هاربر على حق. ففي هذا الوقت الذي نمتلك فيه قدرة غير مسبوقة في فهم الأجنّة والجينات والجينومات ومع التوسّع المستمر في السجل الأحفوري فإن هذه الفجوات تختفي بسرعة.

أحد الأمثلة على الاعتقادات الخاطئة المبنية على هذه الفجوات كان ذلك الذي قدّمه عالم الكيمياء الحيوية مايكل بيهي (Michael Behe) في كتابه الصادر عام 1996 [صندوق دارون الأسود: التحدّي الكيميائي الحيوي للتطوّر] *Darwin's Black Box: The Biochemical Challenge to Evolution*. استُقبل الكتاب بمثابة هدية إلهية من قبل دعاة الخلق لأن كاتبه عالم موثوق. لكن حجة بيهي الرئيسية، وهي أن الخلية الحيّة مُكونٌ ذو تعقيد غير قابل للاختزال (irreducible complexity)، حجة فارغة. كان بيهي يحسب أن علم الأحياء سيفشل في نهاية المطاف في اختزال الظاهرة المعقدة إلى عمليات جزيئية، وبذلك فإنه ينضم لصف طويل من المتكهّنين الذين أزيلت توقعاتهم المتشائمة في الثورة المستمرة لعلوم الحياة.

قام سكوت جلبرت (Scott Gilbert) وهو عالم أحياء في كلية سوارثمور (Swarthmore College)، ومؤلف كتاب جامعي رائد في علم أحياء النموّ، ومؤرّخ بارع لعلم الأجنّة وعلم الأحياء التطوّرية، بتلخيص رأي بيهي وفشله كالتالي: «بالنسبة لدعاة الخلق لا يمكن للتطوّر والجينات أن تفسّر كيف أصبحت بعض الأسماك برمائيات، وكيف أصبحت بعض الزواحف ثدييات، أو كيف أصبح بعض النسّانين ناساً... أطلق بيهي عدم المقدرة على تفسير تكوّن أصنوفات جديدة عبر التطوّر، اسم «صندوق دارون الأسود». عندما يُفتح هذا

الصندوق، فإنه يتوقّع العثور على دليل إلهي، لكن داخل صندوق دارون الأسود لا يكمن غير نوع آخر من علم الجينات: علم جينات النموّ».

لقد سلّط علم جينات النموّ ضوءًا جديداً على صناعة التعقيد وتطوّر التنوّع منذ عشرين عاماً، لكن دعاة الخلق يرفضون بإصرار رؤية ذلك. كيف يمكن لدليل واضح مثل هذا أن يُتجاهل أو يُرفض؟ لا أدعي فهم الآليات النفسية التي تجيز للإنسان إنكار الحقيقة، لكنني أفهم التكتيكات السياسية والبلاغية البائسة لأولئك الخاسرين الذين يرفضون قبولها. وفي حالة دعاة الخلق فإنهم يؤكدون التالي:

1. التطوّر مجرد نظرية، وهناك نظريات أخرى (الخلق أو التصميم الذكي) التي ينبغي أن تعامل بمساواة تحرياً للعدالة.

أو

2. التطوّر احتيال أدامه العلماء، أو أنه فقط علم مزيف. على سبيل المثال أكّد إيان تيلور مدير جمعية العلم الإنجيلي معلقاً على بيان البابا: «تأخذ الكنيسة الكاثوليكية ببيان البابا خطوة أخرى تجاه اعتماد أحد أعظم الخدع المدسوسة على تاريخ الإنسانية... العلماء الأمناء الذين يعرفون ما يقومون به مثل د. مايكل بيهي أشاروا بقوة إلى أن التعقيد غير قابل للاختزال في الخلية الحيّة يجعل التطوّر الموجّه بالصدفة مستحيلاً تماماً».

أو

3. لأن العلماء يختلفون أو غير متيقّنين عادة من كل آليات التطوّر، أو من الإسهام النسبي للقوى المختلفة، أو أنهم لا يعلمون جميع تفاصيل

تاريخ الحياة، فإن انعدام اليقين هذا لهو دليل شك، وعليه فإن التطوّر نظرية ضعيفة لا ينبغي أن تُدرَّس.

التطور خداع أدامه علماء محتالون! في خضمِّ حماستهم يبدو أن دعاة الخلق قد نسوا ما اعتقدتُ أنه سيكون أحد مبادئهم الهادية لسواء السبيل وهو أن المرء لا ينبغي أن يشهد شهادة زور ضد جاره.

وإن بدت المعركة المستمرة مع دعاة الخلق مغيظة، فإن المجتمع العلمي غدا أكثر تنظيماً واستعداداً للتعامل مع التحرّك المضاد للعلم، لكن المعركة ضد الجهل لم تُكسب. بالأحرى يذكرنا هنري ديفيد ثورو، أن كسب المعركة هدف بعيد المدى:

«من الصعوبة أن تقنع إنساناً بخطأ قامت عليه حياته، لكن يجب أن تقنع نفسك بفكرة بطء تقدّم العلم. إن لم يقتنع هو، فسوف يقتنع حفيده. يخبرنا الجيولوجيون أن الأمر استغرق 100 سنة لإثبات أن الأحافير عضوية و150 سنة أخرى لإثبات أنْ لا علاقة لها بطوفان نوح.»

إن الصراع لدفع الفكر التطوّري للأمام ليس مقصوراً على العلم والعلماء. علماء اللاهوت مثل جون هوت John Haught من جامعة جورج تاون كتبوا بشكل واسع عن الحاجة إلى دمج المنظور التطوّري للعلم في البنية الحديثة لعلم اللاهوت. يرى هولت أن الدليل العلمي لمصلحة التطوّر كاسح، ويشير إلى أنَّ نص الكتاب المقدس «كان مؤلفاً

في عصر ما قبل العلم، لذا فإن معناه الأولي لا يمكن أن يستشفَ في مصطلحات علم القرن العشرين» (كما يطالب بذلك دعاة الخلق). ويمضي شارحاً:

> لم يواجه العديد من اللاهوتيين حتى الآن حقيقة أننا نعيش في عصر ما بعد دارون وليس ما قبله، وأن كوناً دائم التطوّر يبدو مختلفاً جداً عن التصوّر المعرفي للعالم في الزمن الذي نشأت فيه أغلب الأفكار الدينية وترعرعت. إن أراد علم اللاهوت النجاة في المناخ الفكري لعالم اليوم، فيجب أن يُصاغ صياغة جديدة بمصطلحات تطوّرية. عندما نفكّر بالإله في عصر ما بعد دارون، فإنه لا يمكننا أن نحتفظ بذات الأفكار التي كانت لدى أوغسطين أو توما الأكويني أو حتى أفكار أجدادنا أو آبائنا. يجب أن نعيد اليوم صياغة كل العقيدة بمصطلحات تطورية.

ناضل هوت من أجل تبيان أهمية التطوّر للقضايا العقدية كالألم والحرية والخلق. ناضل دارون من أجل هذه القضايا أيضًا. يقدم هوت الرؤية بأن الخلق من دون التطوّر سينتج عالماً باهتاً ومجدباً، عالماً تنقصه «جميع عناصر الدراما والتنوّع والمغامرة والجمال العارم التي أنتجها التطوّر. ربما يمتلك ذلك العالم تناغماً غير محدود، لكنه لن يحوي أيًّا من الابتكار والتباين والخطر والاضطرابات والعظمة التي جلبها التطوّر عبر مليارات السنين».

بكل تأكيد لا تبدو هذه عقيدة تقليدية. لكن رسالة هوت منطقية:

يجب على علم اللاهوت أن يتطوّر، وإلا أصبح غير ذي صلة. سنعلم أنَّ الثورة قد اكتملت عندما تُناقش الأحافير والجينات والأجنة (إيجابياً) في موعظة الأحد.

الأشكال اللانهائية الأكثر عرضة للخطر

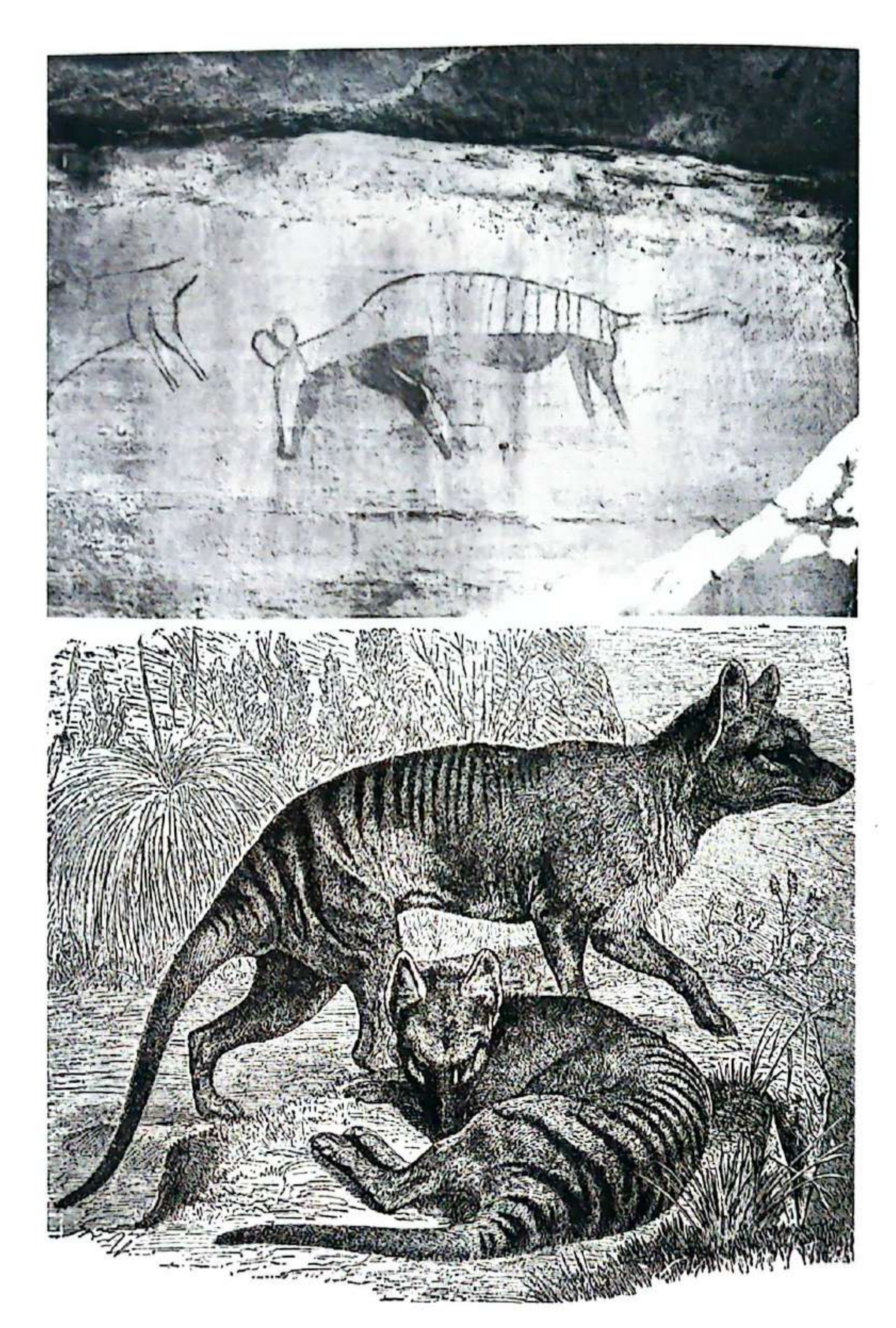
الرهانات على تقبّل أوسع للمنظور التطوّري ليست فلسفية فقط، ففهم تاريخ كوكبنا الحديث والغابر هو المفتاح للإدارة الذكية للكوكب والمحافظة على المجتمعات البشرية.

ترك تطوّر *الإنسان العاقل* وتطوّر ثقافتنا وتقنياتنا وما زال يترك تأثيراً كبيراً على التنوّع الحيوي. يُقدَّر أن تعدادنا كان نحو 10 ملايين نسمة قبل انتشار الزراعة. بلغ تعدادنا 300 مليون سنة 1 ميلادي، وتسارع كثيراً مع بداية الثورة الصناعية ليصل إلى مليار حوالي عام 1800. نحن الآن 6 مليارات ويُتوقع أن يقفز العدد إلى 9 مليارات في الخمسين سنة القادمة، وهي زيادة مقدارها ألف ضعف خلال 10 آلاف سنة فقط.

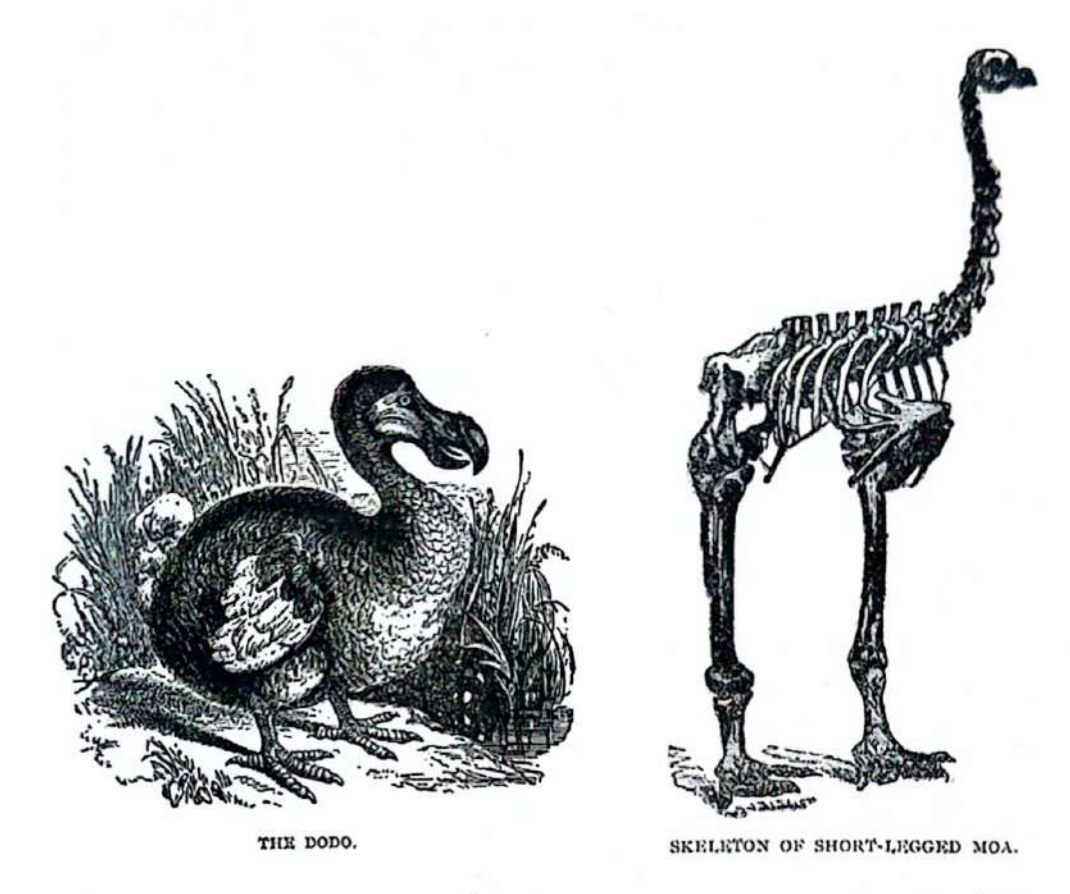
حتى قبل الازدهار الأخير، كان للإنسان وعاداته تأثير كبير أينما يقطن. في رأيي أن أحد الأمثلة على حدّة تأثيرنا مصوّر في المكان المفضّل لدي على الأرض وهو حديقة كاكادو الوطنية في مقاطعة نورثرن تريتوري في أستراليا. فبالإضافة إلى التنوّع المدهش للحيوانات والنباتات الحيّة، فإن كاكادو هو الموقع ذو التاريخ الأطول استمرارية في سجل الاستيطانات البشرية. والرسومات على الصخور التي قام بها سكان أستراليا الأصليون هي من الرسومات الأقدم في العالم. في أُبير Ubirr وهي المنطقة الشمالية من الحديقة توجد عدة معارض تضمّ رسومات

قد يصل تاريخها من20 إلى40 ألف سنة وأخرى تعود لعصور أحدث. في أعلى الوجه الغربي من لوحة متدلية في المعرض الرئيسي توجد رسمة لنمر تسماني thylacine (الشكل 11 ,1)؛ وهو حيوانٌ جرابي marsupial لاحم يُعرف أيضًا باسم الذئب التسماني ونمر فان ديمين البرّي Van Diemen. لقد اختفى هذا الحيوان من مقاطعة نورثرن تريتوري وعموم البر الأسترالي منذ زمن طويل، وهو الآن منقرض تماماً. فقد مات آخر نمر تسماني عام 1936 في إحدى حدائق الحيوانات. في البر الأسترالي وقع النمر التسماني على الأرجح ضحية لكلاب الدنجو dingo القادمة إلى أستراليا مع هجرات السكان الأصليين. إنَّ رسومات الصخور في كاكادو تذكرنا بما عاش وازدهر ذات حين في ذلك المكان المميّز، سواء كان حياة برية أم حياة أفرادٍ من نوعنا.

تكرّرت قصص شبيهة مع تتابع الاستيطانات البشرية في مختلف الأماكن بالعالم. يصور رسم في كهف في فرنسا بيسوناً (bison) وكركدناً منقرضين، وركام عظام هي البقايا الوحيدة من طائر الموا الكبير الذي لا يستطيع الطيران في نيوزيلندا الذي أباده شعب الماوري (الشكل 11 ,2). الرسومات هي المصدر الوحيد لطائر الدودو الذي أباده البحارة في جزيرة موريشيوس (الشكل 11 ,2)، وآخر أفراد الكسلان البري الضخم والماموث الصوفي قُتل من قبل هنود الباليو (Paleo–Indians). كما أن الكواجا (quagga) (الشكل 11 ,3) وهو أحد أربعة أنواع فرعية للحمر الوحشية كان يعيش وقت مولد دارون لكنه انقرض في البرية وقت موته.

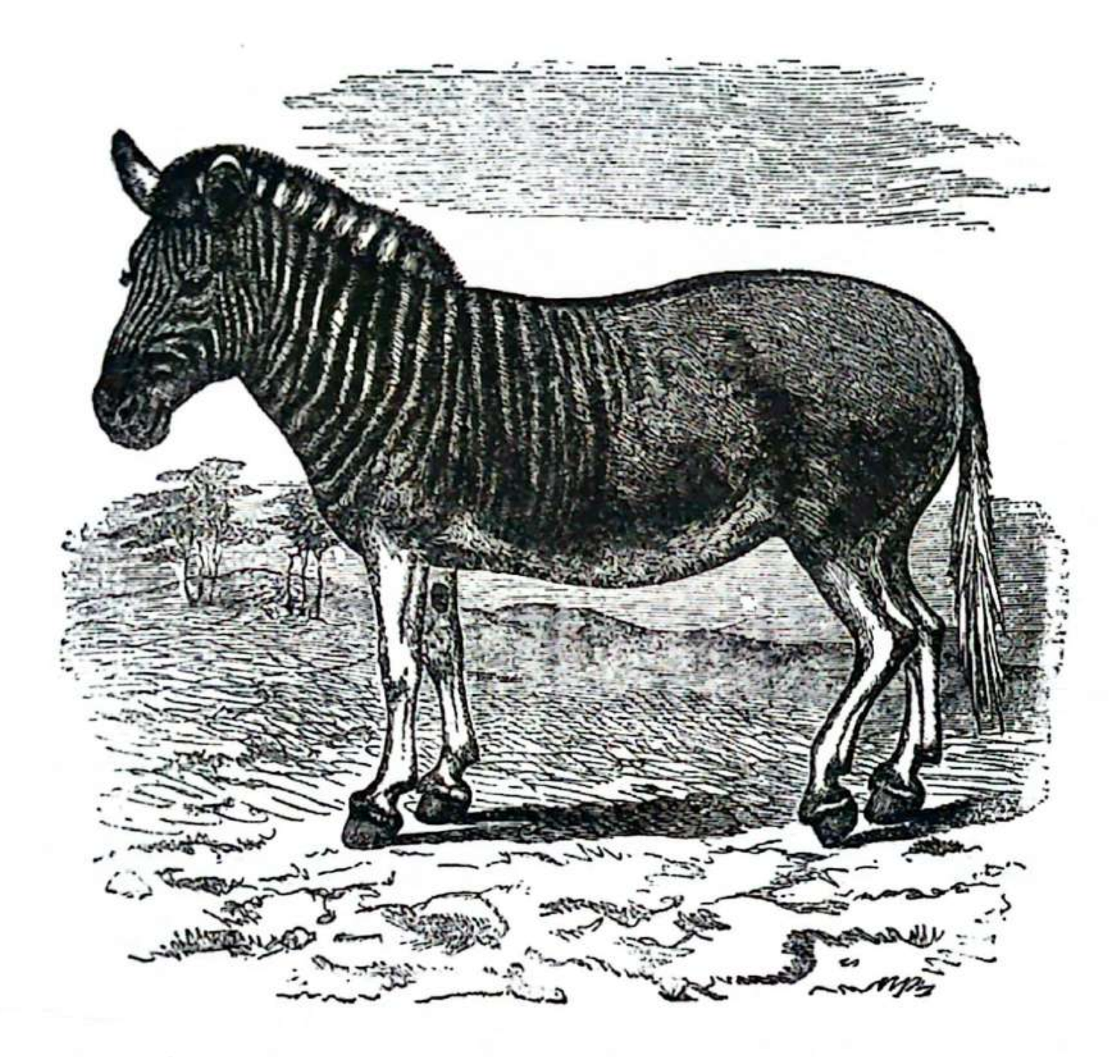


الشكل 1,11 النمر التسماني المنقرض. فوق، رسمة لسكان أستراليا الأصليين على صخرة من منطقة أرنيم Arnhem في نورثرن تريتوري تصوّرُ نمراً تسمانياً، وهو حيوان جرابي مخططٌ لاحم منقرض منذ فترة طويلة من البر الأسترالي. تحت، رسم لعالم طبيعة للنمر التسماني الذي كان يعيش في جزيرة تسمانيا الأسترالية مطلع القرن العشرين (الصورة تقدمة د. كريستوفر تشبنديل (Christopher Chippendale)، جامعة كمبريدج).



الشكل 3,11 **الدودو والموا**. هذان الطائران أفناهما الإنسان في جزر موريشوس ونيوزيلندا، على التوالي.

لكن خسارة هذه الأنواع المفردة تكون باهتة مقارنة بالوضع الحالي لانقراض الحيوانات. إن التدمير واسع النطاق لمواطن الأنواع، وتراجع جودة الماء والتربة، وتلوّث الهواء، وفقدان الغابات المطيرة والشعاب المرجانية يأتي على الأخضر واليابس في التنوّع الحيوي. لم يعد عدد أنواع فراش وببغاوات الأمازون ولا تنوّعها كما وجدها بيتس، ولو رجع دارون إلى جزر جالاباجوس فإنه سيجد أن أيقونات الجزر مثل سلحفاة جالاباجوس والعصافير البرية الكبيرة والعصافير البرية ذات المنقار الحادّ قد انقرضت من بعض الجزر. في ظل سطوة الاعتداء البشري القاسي لم تعد أشكال الطبيعة «لانهائية»، ولا تدّخر منها «الأكثر جمالاً».



الشكل 4,11 **الكواجا**. انقرض هذا النوع الفرعي من الحمار الوحشي أواخر القرن التاسع عشر.

لستُ ساذجاً جداً للاعتقاد أن بإمكان العلم أن يحل جميع مشاكل العالم، لكن الجهل بالعلم أو إنكار حقائقه يُقرِّبُ من الهلاك. تذكر كلمات هكسلي عندما خاطب المعهد الملكي في فجر الثورة الأولى في علم الأحياء. سأل جمهوره عن دور إنجلترا في الإصلاح الفكري الكبير والنبيل الدائر وقتها:

«هل ستلعب إنجلترا هذا الدور؟ يعتمدُ هذا على طريقة تعاملكم أنتم، عامة الناس، مع العلم. إن تعلَّقتم به وبجّلتموه وطبّقتم منهاجه

كلياً وبأمانة على جميع فروع الفكر الإنساني، فإن مستقبل هؤلاء الناس سيكون أعظم من الماضي. لكن إن استمعتم للذين يخرسون العلم ويدمرونه، فإني أخشى أن أطفالنا سيرون عظمة إنجلترا تختفي مثل اختفاء آرثر في الضباب.»

السؤال الذي يواجهنا الآن ليس عظمة إنجلترا أو أمريكا، بل عظمة الطبيعة. أيُ سخرية مأساوية تلك، فكلما ازداد فهمنا للأحياء نقص ما بحوزتنا منها لنتعلّم منه ونستمتع به. ماذا سيكون تراث هذا القرن الجديد؟ هل التعلق بالطبيعة وحمايتها؟ أم سيكون رؤية الفراش والحمر الوحشية والكثير غيرها تتلاشى لتغدو أسطورة كالنمر التسماني والموا والدودو؟

المراجع والقراءات الإضافية

إنَّ الاكتشافات والأفكار التي نوقشت في هذا الكتاب كانت ثمرة جهود علماء عديدين. ولأنّ الكتاب موجه لجمهور عريض، فقد قرَرتُ ألاّ أذكر جميع الأفراد ذوي الصلة بمحتوى الكتاب، ولا أستخدم الهوامش. سأضمّن هذا القسم ملخّصاً للكتب والبحوث العلمية التي اعتمدتُ عليها، وسأقدم اقتراحات لقراءات إضافية حول مواضيع معينة. في أغلب الحالات ستكون عناوين البحوث محذوفة، لكن المراجع المذكورة ستحتوي معلومات كافية للقارئ المهتم كي يجدها.

المقدمة: فراشات، وحمر وحشية، وأجنّة

إن ما حفّز رحلات داروين وبيتس ووالاس وحثهم على تدوينها موجود في سيرهم الذاتية وفي سير أخرى عديدة. لقد اعتمدت على كتاب داروين *Voyage of the Beagle* (المنشور أول مرة عام 1839، وأعيد طبعه مراراً منذ تلك السنة)، وكتاب ه. و. بيتس *Naturalist on the River Amazons* (London: John Murray، 1863). للحصول على خلفية عن السيرة انظر المقدمة التي كتبها A. Shoumatoff في Penguin Nature Library 1988 edition of Bates's classic. pp. vii–xviii. كتاب *Darwin: The Life of a Tormented Evolutionist* (London: Michael Joseph، 1991) لمؤلفيه A. Desmond and J. Moore يمثل مصدر معلومات غنياً عن حياة داروين. إنّ الصداقة التي جمعت بيتس وداروين

والدور الذي لعبته في أخذهما للأمازون موثقة جيداً وتظهر تقريباً في جميع السير التي تناولت الموضوع.

علّق العديد من المؤلفين على الأبعاد الجمالية للعلم. في مقدمتهم Robert Root–Bernstein، الذي أُوصي بشدة بقراءة كتابه الاستثنائي *Discovering: Inventing and Solving Problems at the Frontiers of Scientific Knowledge* (Cambridge. Mass.: Harvard University Press. 1989) ومقاله «The Sciences and Arts Share a Common Creative Aesthetic» في كتاب *The Elusive Synthesis: Aesthetics and Science*. ed. A. Tauber. pp 49—82 (Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 1996). في مقالة مشتركة مع Marion Taber، سلّط Scott Gilbert، وهو عالم نموّ ومؤرّخ للعلم، الضوء على الجانب الجمالي لعلم الأجنة في «Looking at Embryos: The Visual and Conceptual Aesthetics of Emerging Form»، وأيضًا في كتاب Tauber: *The Elusive Synthesis*، ص. 151–122. من ضمن الأعمال التي انتقاها Gilbert and Taber كانت مقالة عالم الأجنة Paul Weiss: «Beauty and the Beast: Life and the Rule of Order». *Scientific Monthly* 81 (1955): 286–99، وقد كانت مقالة استثنائية.

الدور المحوري الذي لعبه علم الأجنة في صياغة داروين للنظرية التطوّرية واضح في صفحات كتاب *The Origin of Species*. ويتجلّى ذلك في مراسلاته، انظر F. Darwin. ed.. *The Life and Letters of Charles Darwin*. يناقش Thomas H. Huxley أيضاً الأجنّة والنموّ بمثابة دليل تطوّري مهم في كتابه: *Man's Place in Nature* المنشور عام 1863.

عولجت المكوّنات الرئيسية للنظرية التركيبية الحديثة في كتب علوم جينات الجماعات والتطوّر التالية: Ronald A. Fisher. *The Genetical Theory of Natural Selection* (Oxford: Clarendon Press. 1930); J. B. S. Haldane. *The Causes of Evolution* (London: Longman. Green. 1932); and Theodosius Dobzhansky. *Genetics and the Origin of Species* (New York: Columbia University Press. 1937); on systematics by Ernst Mayr. *Systematics and the Origin of Species* (New York: Columbia University Press. 1942); and on paleontology by George Gaylord Simpson. *Tempo and Mode in Evolution* (New York: Columbia University Press. 1944). أمّا كتاب Julian Huxley: *Evolution: The Modern Synthesis* (London: Allen and Unwin. 1942) فقد دمج عناصر من علوم الجينات، والأحياء التصنيفية، والأحافير، والنبات.

لقد حلّل مؤلفون عديدون تأثير النظرية التركيبية الحديثة ونواقصها خصوصاً ستيفن جاي جود ونيلز إلدريج. تضمّنت أعمالهم المفردة والمشتركة التالي: N. Eldredge and S. J. Gould. «Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism» in Models in Paleobiology. ed. T. J. M. Schopf. pp. 82–115 (San Francisco: Freeman. Cooper. 1972); S. J. Gould and N. Eldredge. «Punctuated Equilibrium Comes of Age» Nature 366 (1993): 223–27; N. Eldredge. *Unfinished Synthesis: Biological Hierarchies and Modern Evolutionary Thought* (Oxford: Oxford University

and S. J. Gould. *The Structure of Evolutionary* ;(1986 .Press
.(2002 .*Theory* (Cambridge. Mass.: Harvard University Press
ظهر تحليل جود الأول للعلاقة بين علم الأجنّة والعمليات التطوّرية في
Ontogeny and Phylogeny Cambridge. Mass.: Belknap:كتابه المهم
.1977 .Press

قبل ظهور تحفة جود بقرن نشر ردريارد كبلينج: *Just So Stories*
(New York: Doubleday .1902). ويستطيع المرء العثور على طبعات
متعددة من هذه القصص على شبكة الإنترنت.

إنّ ظهور علم النموّ التطوري قد أُرّخ من خلال كتب موجهة
للمتخصّصين وطلاب علم الأحياء. كان الأول Rudy A. Raff and
Thomas C. Kaufman's Embryos. *Genes. and Evolution: The
Developmental-Genetic Basis of Evolutionary Change* (New York:
.Macmillan 1983). الذي تنبأ بالعديد من الأسئلة والاتجاهات المثمرة
التي طرقها العلماء في العقود اللاحقة. ومن ضمن أحدث هذه الكتب
R. A. Raff. *The Shape of Life* (Chicago: University of Chicago
J. Gerhart and M. Kirschner. *Cells. Embryos. and* ;(1996 .Press
E. H. ;(1997 .*Evolution* (Medford. Mass.: Blackwell Science
Davidson. *Genomic Regulatory Systems: Development and*
A. Wilkins. *The* ;(2001 .*Evolution* (San Diego: Academic Press
Evolution of Developmental Pathways (Sunderland. Mass.:
.Sinauer Associates 2001). وهناك كتاب شاركت في تأليفه مع تلامذتي
السابقين (2001); Jen Grenier and Scott Weatherbee. From DNA

to Diversity: Molecular Genetics and the Evolution of Animal .(2005 .2nd ed. (Medford. Mass.: Blackwell Science .Design

1. معمار الحيوان: أشكال حديثة، تصاميم قديمة

للاطلاع على مدخل ممتاز حول أحافير حيوانات فلوريدا، وكيفية العثور عليها، يُنظر كتاب Mark Renz. *Fossiling in Florida: A Guide for Diggers and Divers* (Gainesville: University Press of Florida. (1999. ينظم مارك رحلات لاصطياد الأحافير (للتواصل معه: Fossilx@earthlink.net) وأشكره على تعليمي وعائلتي كيف يتم البحث عن الأحافير في أنهار فلوريدا ولمساعدته إيانا على تحديد هوية ما عثرنا عليه.

أفكار المدولية والتكرار التسلسلي قد سردت ونوقشت في كتاب: W. .Bateson. *Materials for the Study of Variation* (London: Macmillan .1894). بينما شُرح قانون ويلتسون في كتاب: S. W. Williston. *Water Reptiles of the Past and Present* (Chicago: University of Chicago Press. 1914). ظهرت المعالجات الأحدث لأهمية المدولية، والتماثل والتماثل التسلسلي في الأعمال التالية: G. P. Wagner. *American Zoologist* 36 (1996): 36–13. and G. P. Wagner. *Evolution* 43 (1989): 1157–71.

2. وحوش وطافرات وجينات حاكمة

يمكن العودة إلى R. F. Keeler and W Binns. *Teratology* 1

(1968): 5–10 للاطلاع على اكتشاف السايكلوبامين وارتباطه بزنبق *فيراترم كاليفورنيكم* مع مقدمة عن التصقلب.

التجربة الكلاسيكية التي تصف المعضّيات في أجنّة سمندل الماء والضفدع وفي طرف الدجاجة يمكن الاطلاع عليها في الكتب الجامعية الحديثة، مثل Scott F. Gilbert. *Developmental Biology*. 7th ed. (Sunderland. Mass.: Sinauer Associates. 2003). and L. Wolpert et al.. *Principles of Development*. 2nd ed. (Oxford: Oxford University Press. 2002). تجارب سبيمان وتلميذه هايلد مانجولد مفصّلة في H. Spemann. *Embryonic Development and Induction* (New Haven: Yale University Press. 1938). وأيضاً عند John W. Saunders and his associate M. T. Gesseling in R. Fleischmajer and R. E. Bilingham. eds.. *Epithelial Mesenchymal Interactions* (Baltimore: Williams and Wilkins. 1968). pp. 78–97. التجارب التي وصفت معضّيات العُيينات في جناح الفراشة ذكرت أول مرة في H. F. Nijhout. *Developmental Biology* 80 (1980): 267–74.

صكّ Richard Goldschmidt مصطلح «وحوش واعدة» في كتابه *The Material Basis of Evolution* (New Haven: Yale University Press. 1940). انظر المقدمة التي كتبها S. J. Gould في الطبعة الجديدة من الكتاب (1982). pp. viii–xlii، وللاطلاع على مناقشة حول المصطلح انظر أيضاً S. J. Gould's «Helpful Monsters» in Hen's Teeth and Horse's Toes (New York: W. W. Norton. 1983). pp. 187–98.

بالنسبة لتوصيف العَنَش وإحصائيات حدوثه فقد اعتمدت

على مقابلة مع W. F. Bakker et al. in the Electronic *journal of Hand Surgery*. November 11. 1997. and accessed online. 112 L. G. Biesecker. *American Journal of Medical Genetics* (2002): 279–83. بالنسبة لقصص حول أفراد مصابين بالعَنَش، انظر: BaseballLibrary.com لمعلومات عنAntonio Alfonseca، وانظر: Wikipedia.org للشخصيات التاريخية، وانظر: melungeanhealth.org للعنش في السكان الأتراك. للاطلاع على معالجة رائعة لجميع أنواع العيوب الخلقية الناشئة عن النموّ عند البشر انظر: A. M. Leroi. Mutants: *On Genetic Variety and the Human Body* (New York: Viking Press. 2003).

الأدبيات العلمية حول الطافرات النحتية عديدة، يتوفر وصف مختصر في كتب النموّ الجامعية التي ذكرتها آنفاً وفي مقالة « Gould: Helpful Monsters». يوجد شرح مطول عن السياق الكامل لنموّ ذبابة في: Peter Lawrence. *The Making of a Fly* (Cambridge. Mass.: Blackwell Science. 1992).

3. من الإي كولاي إلى الفيلة

نشأة علم الأحياء الجزيئية، من تركيبة الدنا إلى فك الشفرة الجينية، واكشافات جاكوب ومونو للمنطق الذي يكمن وراء تأيّض اللاكتوز في الإي كولاي مفصّل في كتاب Horace Freeland Judson المهم: *The Eighth Day of Creation: The Makers of the Revolution in Biology* (New York: Simon and Schuster. 1979; reprint. with an updated

.(1996 .preface. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press
هذا الكتاب هو أحد أفضل الكتب كتابة والأعمق بحثاً وتقميشاً في مجاله .

الشروحات حول الكيفية التي تشفر وتفك بها المعلومات الجينية يمكن الحصول عليها في أغلب المناهج الدراسية لطلبة الجامعات، وعبر البحث في الإنترنت باستخدام الكلمة المفتاحية « .DNA. RNA and proteins» حيث ستقودك إلى نُبذ عديدة حول الموضوع. التحكم بإنتاج البيتا-جالاكتوسايديز مفصّل في أغلب الكتب الجامعية الخاصة بالأحياء الجزيئية والجينات، وفي المراجعات التالية: J. H. Miller and W. S. Reznikoff. eds.. *The Operon* (Cold Spring Harbor. N.Y.: .(1978 .Cold Spring Harbor Laboratory Press

كتب جاك مونو وفرانسوا جاكوب التي ذكرتها هي .J. Monod. *Chance and Necessity* (New York: Alfred A. Knopf F. ;(1971 .Jacob. *The Logic of Life* (New York: Pantheon and F. ;(1974 Jacob. *The Statue Within: An Autobiography* (New York: Basic 1988 .Books) . لفرانسوا جاكوب كتاب أحدث حول الاكتشافات اللاحقة في علم أحياء النمو والجينات ويتضمن قصة صندوق النحت بعنوان *Of Flies. Mice. and Men: On the Revolution in Modern Biology by One of the Scientists Who Helped Make It* (Cambridge. .(1998 .Mass.: Harvard University Press

للاطلاع على أوراق مهمة حول جينات مجمعات الأنتينابيديا والبيثوراكس انظر: E. Lewis. *Nature* 276 (1978): 565-70. and B.

:(1981) 81 Wakimoto and T. Kaufman. *Developmental Biology* 51–64 . اكتشف صندوق النحت بالتوازي أفراد يعملون في مختبرين مختلفين، أحدهما مختبر تحت إشراف Thorn Kaufman في جامعة إنديانا والآخر تحت إشراف Walter Gehring في جامعة بازل. يمكن العثور على تقارير تصف الاكتشاف في Peter Lawrence. *The Making of* in W. .(1992 *.the Fly* (Medford. Mass.: Blackwell Science Gehring. Master *Control Genes in Development and Evolution:* .(1999 *.The Homeobox Story* (New Haven: Yale University Press *Genetics* 137 and in W. McGinnis. (1994): 607–11. المصادر الأولية هي: M. P. Scott and A. J. Weiner. Proceedings *of the National* and W. McGinnis .19–4115 :(1984) 81 *Academy of Science*. USA *Nature* 308 et al.. (1984): 428—33. والتقرير الذي رصد التشابه بين نطاق النحت والبروتينات التنظيمية المعروفة في البكتيريا والخميرة هو 31–25 :(1984) 310 A. S. Laughon and M. P. Scott. *Nature*. اكتشاف صندوق النحت في الحيوانات الأخرى ورد في W. McGinnis *Cell* 37 et al.. (1984): 403–8، وظهر مقال Jonathan Slack الذي قارن صندوق النحت بحجر رشيد في *Nature* 310 (1984): 364–65 وللاطلاع على تعليقStephen Jay Gould حول أهمية صندوق النحت انظر *Natural History* 94 (1985): 12–23.

اكتشاف خصائص انتظام جينات Hox في عناقيد ونشاطها على طول محاور الجسم في الفقاريات موجود في D. Duboule and P. and A. Graham. N. .1505–1497 :(1989) 8 Dollé. *EMBO Journal*

.78–367 :(1989) 57 Papalapov. and R. Krumlauf. *Cell*

التماثل بين جين عديم *العين* في ذبابة الفاكهة وجين *العين الصغيرة* والجين *المقرّح* في الفئران والبشر على التوالي رصده ..R. Quiring et al *Science* 265 (1994): 785–89، ومقدرة منتجات جيني *عديم العين* *والعين الصغيرة* على تحفيز غشاء العين في مواقع إضافية في الذبابة قد جاء في تقرير G. Haider. P. Callaerts. and W. Gehring. *Science* 267 (1994): 1788–92. وعلى هذا العمل علّق S. J. Gould في *Natural History* 103 (1994): 12–20 وكتب ريتشارد دوكنز Richard Hawkins شرحاً عظيماً حول تطور العيون عنوانه «The Forty–Fold Path to Enlightenment» في كتابه :*Climbing Mount Improbable* (New York .97–138 .pp .(1996 .W. W. Norton

إن استخدام جين *انعدام الأطراف القاصية* ومتناددداته في تشكيل أنواع عديدة من الزوائد ظهر في تقرير ..G. Panganiban et al :(1997) 94 *Proceedings of the National Academy of Science*. USA 5162–66. ونوقشت أهمية دور جينيْ الصندوق النحتي *رجل الصفيح* و*NK2* في بناء قلوب الفقاريات والذباب في .R. Bodmer and T. V .86–181:(1998) 22 Venkatregh. *Developmental Genetics*

يمكن العثور على رؤية Enrst Mayr حول المسافة التطوّرية في كتابه *Animal Species and Evolution* (Cambridge. Mass.: Harvard University Press. 1963). p. 609، والعثور على تعليق Stephen Jay Gould في *The Structure of Evolutionary Theory* (Cambridge. .1065 .p (2002 .Mass.: Harvard University Press

التقرير الأول لتقصي Nüsslein-Volhard and Wieschaus الرائد عن الجينات التي تنحت نمط جنين ذبابة الفاكهة ظهر في *Nature* 287 (1980): 795-801، وبعد سنوات عديدة عُيّن جين *القنفذ* في ذبابة الفاكهة وبعد ذلك بقليل عُيِّنت متنادداته الفقارية. إن مقدرة بروتين القنفذ سونك على محاكاة نشاط منطقة النشاط الاستقطابي (ZPA) في طرف الذبابة ظهر في R. Riddle et al.. *Cell* 75 (1993): 1401-16، وارتباط الطفرات في القنفذ سونك بظاهرة العَنَش في البشر موجود في L. Lettice et al.. *Proceedings of the National Academy of Science*. USA 99 (2002): 7548-53.

إن تحفيز التصقلب عبر طفرات في جين *القنفذ سونك* جاءت في C. Chiang et al.. *Nature* 383 (1996): 407-13. اقتران هذه الملاحظة باكتشاف أن بعض السرطانات مرتبطة بطفرات في جينات أخرى في ذات المعبر أدّت إلى اختبار cyclopamine كعلاج كيميائي محتمل see J. Taipale et al.. *Nature* (2000): 1005-9. وللاطلاع على التعليق انظر: A. E. Bale. *Nature* 406 (2000): 944-45 .

4. صناعة الأطفال: 25,000 جين، بعض التجميع مطلوب

بالعنوان تناص مع قصة وردت في Scott Gilbert and Marion Taber's «Looking at Embryos: The Visual and Conceptual Aesthetics of Emerging Forms» in The Elusive Synthesis: Science and Aesthetics. ed. A. Tauberg. pp 125-51 (Netherlands: Kluwar Academic Publishers. 1996). ذكروا أنه في العام 1992 حملت

لافتة فيها «الفأر المكتمل» وبين *Encyclopedia of Mouse Genome* قوسين «يلزم بعض التجميع». أيضًا كان Gilbert and Taber المصدر الذي سرد قصة Paul Weiss حول استرجاع الدجاجة.

إن مقارنة علم الأجنة بصناعة الخرائط شرحه .Stephen S. Hall *Mapping the Next Millennium: The Discovery of New Geographies* (New York: Random House. 1992). pp. 193—214. قدم Hall في كتابه حجّة مقنعة حول الدور المركزي لصناعة الخرائط في العلوم، وقد أصاب فيما يتعلق بعلوم الجينات والأجنّة والجينومات.

لقد شُرِحَتْ عمليات النمو الجنيني في كتابين خصّصهما عَالِمَا نموّ عظيمان للقراء غير المتخصّصين. Lewis Wolpert. *Triumph of the Embryo* (New York: Oxford University Press. 1991) كتاب دقيق وواضح جداً في إبراز الخطوات الرئيسية اللازمة لصناعة الأجنة والأبنية. ولكتاب Enrico Coen. *Art of the Genes: How Organisms Copy Themselves* (Oxford: Oxford University Press. 1998) طريقة فريدة تربط علم الأجنّة بالفن لإضاءة الكيفية التي تشفر وتكشف بها الأنماط.

وصفت خرائط المصير في جميع كتب أحياء النموّ بما في ذلك الكتب التي رجعت إليها في كتابة الفصل الثاني. صدرت مؤخراً مراجعة ممتازة للأهداف والاستراتيجيات والمناهج الجديدة المستخدمة في تحديد خرائط المصير وهي J. D. W. Clarke and Tickle. *Nature Cell Biology* 1 (1999): E103–9. ولقد بُسِّط الشكلان 4,1 و2,4 من مصادر مختلفة منها ما ذكر بالأعلى وبالنسبة لخرائط المصير فهي من

عمل Volker Hartenstein ونشرت بمثابة أطلس إضافي في M. Bate and A. Martinez-Arias. eds.. *The Development of Drosophila melanogaster* (Cold Spring Harbor. N.Y: Cold Spring Harbor .(1993 .Laboratory Press

إنّ شروحات نشاط جينات عدة الأدوات قد استخلصت من دراسات أنجزت في مختبري، ومن التقارير العلمية الأولية، وكتب تعليمية، وأيضًا من معلومات وصور زودها زملاء. مرة أخرى، إن كتب علم النموّ التي أشرت لها تحتوي تفاصيل إضافية لأغلب لمعلومات المذكورة. يحتوي كتاب Peter Lawrence. *The Making of the Fly* (Cambridge. Mass.: Blackwell Science .1992) على تفاصيل كثيرة عن الجينات النشطة في جنين الذبابة، وكتاب Sean B. Carroll. Jen Grenier. and Scott Weatherbee. *From DNA to Diversity: Molecular Genetics and the Evolution of Animal Design*. 2nd ed. (Medford. Mass.: Blackwell Science .2005). يصف كذلك الخطوات المطلوبة في بناء الذباب والفقاريات. أمّا المراجعات التي تغطي بعمق مواضيع معينة فهي تتضمن التالي: للأجنّة المبكّرة في الفقاريات E. M. De Robertis et al.. *Nature Reviews Genetics* 1 (2000): 171-81، ولصناعة الفصوص في الفقاريات: O. Pourquie. *Science* 301 (2003): 328—30، ولصناعة الطرف في الفقاريات F. Moriani and G. R. Martin. *Nature* 423 (2003): 319-25;، ولصناعة الدماغ الخلفي C. B. Moens and V. E. Prince. *Developmental Dynamics* 224 (2002): 1—17.

إنّ شرح التشبيط الجانبي اسْتُقرئ من أمثلة عديدة مثل تموضع الهلب وبراعم الريش. نوقش هذا المفهوم بالتفصيل واستعرضت أمثلة عديدة في H. Meinhardt and A. Gierer. *BioEssays* 22 (2002): 753–60.

توجد العديد من التمارين والرسوم المتحركة الممتازة حول توليد الأنماط الدورية والفراغات التي تشغلها في الموقع الإلكتروني لهذين المؤلفين: www.eb.tuebin–gen.mpg.de /dept4/ meinhardt /home.html.

اقتباس فرانسوا مونو لجون بيغان ظهر في مقاله «Evolution and Tinkering.» *Science* 196 (1977): 1161–66. جون بيغان حائز على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1926 واقتبست أعماله حول الغروانيات colloids والحركة البراونية. كتب بيغان كتاباً راج كثيراً وهو *Les Atomes* (1913) منه أخذ الاقتباس.

5 . المادة المظلمة في الجينوم: تعليمات تشغيلية لعدّة الأدوات

إنّ تعرفي الأولي على مصطلح «المادة المظلمة» كان في كتاب Brian Greene's The Elegant Universe (New York: W. W. Norton. 1999) وهو كتاب مشوّق جداً حول بناء الكون من أصغر المستويات إلى أكبرها، وفي الكتاب الممتاز Martin Rees. *Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe* (New York: Basic Books. 2001). ولكتابات إضافية راجع Dennis Overbye. «From Light to Darkness: Astronomy's New Universe.» The New York Times. 10 April. 2001. 9 and Vera Rubin. *Scientific American Presents* no. 1 (1998). 106—10.

توجد كتابات متعدّدة تركّز على تفاصيل خصائص المفاتيح الجينية. المرجع الكلاسيكي كتاب Mark Ptashne A Genetic Switch. 2nd ed. (Cambridge. Mass.: Blackwell Science. 1992) وهو دليل توجيهي قصير ومتدرّج لكنه مليء بعديد من الرسومات الشارحة عن المفاتيح الجينية، ورغم تركيزه أساساً على مفاتيح العاثيات bacteriophage إلاّ أنه يحتوي على أمثلة من كائنات أكثر تعقيداً. إنّ كتاب Eric H. Davidson. *Genomic Regulatory Systems: Development and Evolution* (San Diego: Academic Press. 2001) أكثر عمقاً ويشرح منطق وعمليات المفاتيح الأكثر تعقيداً في جينات الحيوانات.

تقديرات حجم الدنا غير المشفرة junk في جينومنا ونسبة الجزء المنظّم مبنية على دراسات سلسلة جينوم الإنسان وعلى مقارنات بالأنواع الأخرى، خاصة الفأر، كما شُرِحَ في Mouse Genome Sequencing Consortium. *Nature* 420 (2002): 520-62.

للاطلاع على المراجع الرئيسية حول عمل المفاتيح الجينية في وضع أشرطة وعناقيد الخلايا في مواضعها، انظر: D. Stanojevic. S. Small. and M. Levine. *Science* 254 (1991): 1385-87; S. Small. A. Blair. and M. Levine. *EMBO Journal* 11 (1992): 4047-57; G. Vachon et al.. *Cell* 71 (1992): 437-50; J. Jiang and M. Levine. *Cell* 72 (1993): 741—52; S. Gray. P. Szymanski. and M. Levine. *Genes and Development* 8 (1994): 1829-38; S. Gray and M. Levine. *Genes and Development* 10 (1996): 700—710; P. Szymanski and M. Levine. *EMBO Journal* 14 (1995): 2229-38; and J. Cowden

.49–335 :(2003) 262 and M. Levine. *Developmental Biology* أمّا المتواليات التوقيعية التي ترتبط بها بروتينات عدة أدوات معينة فقد ذكرت في المراجع السابقة وأيضاً في S. Jun et al.. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. USA 95 (1998): 13720–725; S. Knirr and M. Frasch. *Developmental Biology* 238 (2001): 13–26; and S. C. Ekker et al.. *EMBO Journal* 13 (1994): 3551–60.

نوقشت النماذج الشبيهة بنموذج تورنج لتكوين النمط في S. Kauffman. *The Origins of Order* (Oxford: Oxford University Press. 1993) and P. Ball. *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature* (Oxford: Oxford University Press. 1999). إنّ مقارنة تحليل الكتابين لنموّ الذبابة عملية شيّقة، فمعالجة كاوفمان أطول وأكثر تعقيداً ولم تتضمن اكتشاف المفاتيح التي تصنع الأشرطة المفردة (اكتشفت المفاتيح قبل نشر الكتاب بستتين)، بينما كانت معالجة بول مبسطة كثيراً ووُضِّحت عبر وصف كيف تقوم المفاتيح بتحويل أنماط ضبابية مبهمة إلى أنماط أدق. لم تتسرّب حتى الآن الأهمية الرئيسية للمفاتيح الجينية في تكوين النمط إلى عالم النمذجة الحاسوبية، راجع على سبيل المثال S. Wolfram. *A New Kind of Science* (Champaign: Wolfram Media. 2002). 111. الغلطة المستمرة هي إغراء الاعتقاد بأن القوانين البسيطة التي تكوّن النمط في شاشة الحاسوب هي ذاتها القوانين التي تكون الأنماط في الأحياء.

لمعلومات عن المفاتيح الجينية لجين *BMP5* اعتمدتُ على تواصل شخصي مع Dr. David Kingsley of Stanford University and on R. J.

Di Leone et al.. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. USA 97 (2000): 1612–17. إنّ المنطق الذي يحكم الطريقة التي تفرّق بها بروتينات Hox وبروتينات عُدّة الأدوات الأخرى بين المداول في أجسام الحيوان ملخصة في S. D. Weatherbee and S. B. Carroll. *Cell* 97 (1999): 283–86.

6. الانفجار العظيم لتطوّر الحيوان

توجد كتب ممتازة عديدة للقارئ العام مخصّصة كلياً أو جزئياً لتناول الانفجار الكامبري. كان كتاب S. J. Gould. *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History* (New York: W. W. Norton. 1989) أول ما قدّم الظاهرة الكامبرية للجمهور العام. ويسرد كتاب Simon Conway Morris. *The Crucible of Creation: The Burgess Shale and the Rise of Animals* (New York: Oxford University Press. 1998) القصة من منظور أحد أبرز علماء الأحافير، ويحتوي أحدث التفاسير والرؤى المستقاة من المواقع الكامبرية الأخرى. ويغطي كتاب Andrew H. Knoll. *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth* (Princeton: Princeton University Press. 2003) كامل تاريخ الحياة المعروف حتى العصر الكامبري، وفي الكتاب جمعٌ رائع لعلوم الجيولوجيا والكيمياء الجيولوجية والأحافير. إنّ كتاب Derek E. G. Briggs. Douglas H. Erwin. and Frederick J. Collier. *The Fossils of the Burgess Shale* (Washington. D.C.: Smithsonian Institution Press. 1994) فهرس

جميل لوصف أحافير بيرجس.

إن أوّل وصف لثنائي الجانب البدائي Urbilateria كان E. M. De Robertis and Y. Sasai. *Nature* 380 (1996): 37-40. والأبحاث الإضافية التي درسته هي De Robertis. *Nature* 387 (1997): 25-36; C. B. Kimmel. *Trends in Genetics* 12 (1996): 329-31; N. Shubin. C. Tabin. and S. Carroll. *Nature* 388 (1997): 639-48; D. Arendt and J. Wittbrodt. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 350 (2001): 1545-63; D. Arendt. U. Technau. and J. Wittbrodt. *Nature* 409 (2001): 81-85; A. H. Knoll and S. B. Carroll. *Science* 284 (1999): 2129-37; D. H. Erwin and E. H. Davidson. *Development* 129 (2002): 3021-32; and A. Peel and M. Akam. Current Biology 18 (2003): R708-10.

ما اقتبسته عن رأي دارون حول أصول الإنسان أتى من رسالته إلى Charles Lyell of January 10. 1860 المنشورة في *The Life and Letters of Charles Darwin*. ed. F. Darwin. vol. 2 (London: John Murray. 1887).

للحصول على خلفية حول تطوّر فصّيات الأقدام lobopodia اعتمدتُ على G. E. Budd. *Lethaia* 29 (1996): 1-14. وعلى تواصلي الشخصي مع Dr. Graham Budd من University of Uppsala في السويد.

إنّ فرضية لويس حول «الجينات الجديدة» ظهرت في E. B. Lewis. *Nature* 276 (1978): 565-70، وصف جينات النحت في Onychophorans موجود في J. K. Grenier et al.. *Current Biology*

7(1997): 547-53. الأدبيات العلمية حول إزاحة مناطق Hox في مفصليات الأرجل هامة وتنمو باستمرار، والمراجع الرئيسية هي .M S. B. Carroll. ;23-420 :(1995) 376 Averof and M. Akam. *Nature* M. Averof and N. H. Patel. *Nature* .85-479 :(1995) 376 *Nature* 129 L. Hughes and . Kaufman. *Development* ;87-682 :(1997) 388 .95-386 :(2003) 28 and N. Hughes. *BioEssays* ;38-1225 :(2002)

الوصف الدقيق لـ *Haikouichthys* موجود في ..D. G. Shu et al *cephalochordate* في *Hox* وتحليل جينات ،29-526 :(2003) 421 *Nature* 370 J. Garcia-Fernandez and P. W. Holland. *Nature* ظهر في .H ظهر lamprey and hagfish في *Hox* ولجينات ،66-563 :(1994) :(2002) 19 Ecriva et al.. *Molecular and Biological Evolution* and C. Fried. S. J. Prohaska. and P. F. Stadler. *Journal* .50-1440 *of Experimental Zoology Part B Molecular and Developmental* C.-B. Kim et في ولأسماك القرش ;25-18 :(2003) 299 *Evolution* 97 al.. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. USA S. M. Shimeld and في نوقشت ابتكارات الفقاريات .60-1055 :(2000) P. W. Holland. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. and G. P. Wagner. Amemiya. and F .52-4449 :(2000) 97 USA Ruddle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. USA 100 (2003): 14603—606. جاء نشاط جينات *Hox* في فقاريات مختلفة بالتفصيل في ..*Development* A. C. Burke et al. 121(1995): 333-46. وتطور .79-474 :(1999) 399 and M. J. Cohn and Tickle. *Nature*

مفتاح جين *Hox* فقاري عُرِضَ في H.-G. Belting. C. Shashikant. and F. H. Ruddle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. USA 95 (1998): 2355-60.

لمناقشة دور البيئة في العصر الكامبري، انظر Knoll. *Life on a Young Planet*.

7. انفجارات صغيرة: الأجنحة واختراعات ثورية أخرى

تواريخ السكين والشوكة ومشابك الورق مشروح في A. B. Duthie. *Journal of Memetics—Evolutionary Models of Information Transmission* 8 (2003)، ومتوفّر في الرابط: http://jom-emit.cfpm.org/2004/vol8/duthie_ab.html، وأيضًا في H. Petroski. *The Evolution of Useful Things* (New York: Vintage Books 1992).

مناقشة دارون لأهمية تعدّدية الوظائف والمزيد موجود في الفصل السادس «Difficulties of the Theory» من كتابه *The Origin of Species*.

نوقش بناء الأطراف ثنائية التفرّع في: S. J. Gould. *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History* (New York: W. W. Norton. 1989).، وسيناريوهات نشوئها نوقشت في G. E. Budd. *Lethaia* 29 (1996): 1-14. and N. Shubin. C. Tabin. and S. Carroll. *Nature* 388 (1997): 639-48. أعلن عن نشاط جين *انعدام الأطراف القاصية* المسؤول عن بناء الأطراف في arthropod and Onychophoran في التقارير التالية: G. Panganiban et al.. *Science* 270 (1995): 1363—66. and Panganiban et al.. *Proceedings of the National Academy of*

.66–5162 :(1997) 94 *Sciences*. USA

إنّ الدليل على تطوّر جناح الحشرات من تفرع خياشيم في سلف مائي موجود في M. Averof and S. M. Cohen. *Nature* 385 (1997): 627—30. استخلص سيناريو تطور عدد أجنحة الحشرات من S. B. Carroll. S. D. Weatherbee. and J. A. Langeland. *Nature* 375 (1995): 58–61 وبني السيناريو بشكل جزئي على دليل أحفوري في J. Kukalova–Peck. *Journal of Morphology* 156 (1978): 53–126.

الدليل على تطور مغازل العناكب والرئات الكتابية وقصبات هوائية أنبوبية من تفرّع خياشيم سالف موجود في W. G. M. Damen. T. Saridaki. and M. Averof. *Current Biology* 12 (2002): 1711–16. أعلن عن مناطق *Hox* المختلفة في العناكب في تقارير W. G. M. Damen et al.. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. USA 95 (1998): 10665—670. and A. Abzhanov. A. Popadic. and T. C. Kaurman. *Evolution and Development* 1 (1999): 77–89. تطوّر الجناح الخلفي للحشرات تحت تحكم بروتين ألترابيثوراكس مبني على S. D. Weatherbee et al.. *Current Biology* 11 (1999): 109–15.

للاطلاع على معالجة مفصّلة لتطوّر طرف الفقاريات للتكيّف على اليابسة وأيضًا عند رجوعه إلى الماء، انظر Carl Zimmer. *At the Water's Edge: Macroevolution and the Transformation of Life* (New York: Free Press. 1998). أوصاف Sauripteris. Acanthostega. Tulerpeton وأحافير أخرى موجودة في E. B. Daeschler and N. Shubin. *Nature* 391 (1998): 133. and M. I. Coates. J. E. Jeffrey. and M. Rut.

Evolution and Development 4 (2002): 390-401. تطورت القدم المستقلة autopod بالنسبة لجينات *Hox* مشروح في P. Sardino. F. van der Hoeven. and D Duboule. *Nature* 375 (1995): 678-81; N. Shubin. Tabin. and S. Carroll. *Nature* 388 (1997): 639-48; and M. Kmita et al. *Nature* 420 (2002): 145-50.

إنّ تطوّر أشكال مختلفة من أجنحة الفقاريات كان محل تركيز كتاب Pat Shipman. *Taking Wing: Archeopteryx and the Evolution of Bird Flight*. (New York: Simon and Schuster 1998). الأساس النهائي لانعدام الأطراف في الثعابين كُشف عبر M. J. Cohn and C. Tickle. *Nature* 399 (1999): 474—79. تطوّر تقلّص شوك سمكة أبي شوكة ثلاثية الأشواك مشروح في *Nature*.. M. D. Shapiro et al. 428 (2004): 717-23.، والسجل الأحفوري الاستثنائي ذي الوضوح العالي لسمكة أبي شوكة مبين في M. A. Bell. J. V. Baumgartner. and E. C. Olsen. *Paleobiology* 11 (1985): 258-71.

8. كيف حصلت الفراشة على بقعها؟

رغم كثرة تداول الاقتباس الوارد في بداية الفصل إلاَّ أن مونو لم يقله قط، ولذا فإنه يستحق وقفة خاصة. كتب مونو في *Le Hasard et la Nécessité*. (Paris: Editions du Seuil 1970) التالي: «Hasard capté. conserve. reproduit per la machinerie de l'invariance et ainsi converti en ordre. régie. nécessité» (p. 128). قام مترجم مونو إلى الإنجليزية Austryn Wainhouse بترجمة «hasard capté» إلى

«عشوائية التقطت على جناح السرعة»، لكن إن كانت الترجمة حرفية فإنها ستكون: «فرصة (أو عشوائية) التقطت». قام Stuart Kauffman في كتابه *At Home in the Universe* (New York: Oxford University Press. 1995)، باقتباس مونو على أنه قال: «فرصة التقطت على جناح السرعة» (ص 71)، ثم وسّع الاقتباس ليغدو: «التطوّر فرصة التقطت على جناح السرعة» (ص 97). إنها جملة بديعة وتستحق الاقتباس لكن لا مونو ولا مترجمه قالاها.

الإحصائيات حول ما جمعه بيتس موجودة في H. W. Bates. *Naturalist on the River Amazons* (London: John Murray. 1863).

الرسالة المقتبسة التي بعث بها بيتس إلى دارون استلمت تاريخ 28 مارس عام 1862. تعليق دارون الشغوف بورقة بيتس حول المحاكاة كُتب تاريخ 20 نوفمبر 1862، وظهر في *The Life and Letters of Charles Darwin*. ed. E Darwin. vol. 2 (London: John Murray. 1887).

نشر تقدير دارون لكتاب بيتس في *Natural History Review* 3 (1863).

جميع العبارات المقتبسة حول الفراش كانت من *Naturalist on the River Amazons*. وللاستزادة حول نابكوف، انظر K. Johnson and S. Coates. *Nabokov's Blues: The Scientific Odyssey of a Literacy Genius* (Cambridge. Mass.: Zoland. 1999).

أكثر تحليل لأنماط جناح الفراشة شمولاً هو كتاب H. Frederik Nijhout. *The Development and Evolution of Butterfly Wing Patterns* (Washington. D.C.: Smithsonian Institution Press. 1991) الذي يقدم شرحاً كثيراً حول ما ذكرته عن بناء أنماط الجناح وتنوعه.

أعلن عن جين عدّة الأداوت المرتبط بنمو الحراشف في R. Galant et al.. *Current Biology* 8 (1998): 807-13.

اكتشاف نشاط جين *انعدام الأطراف القاصية Dll* في بقع الأجنحة النامية موجود في S. B. Carroll et al.. *Science* 265 (1994): 109-14; see also S. B. Carroll. *Natural History*. February 1997. pp. 28-37.

مقارنة نشاط *Dll* في الأنواع المختلفة موضح في P. M. Brakefield et al.. *Nature* 384 (1996): 236^-2. بروتينات عدة الأدوات التي تُعلّم الحلقات الخارجية في العُيينات أعلن عنها في تقرير C. R. Brunetti et al.. *Current Biology* 11 (2001): 1578-85.

تمت دراسة دور العُيينات المقلصة في الاختفاء على مخلفات الأوراق الميتة عبر A. Lytinen et al.. *Proceedings of the Royal Society of London B* 271 (2004): 279—83. إنّ ارتفاع نشاط *Dll* في الفراش في درجات حرارة مختلفة جاء في P. M. Brakefield et al.. *op. cit*.. المتحولة *الرقطاء* وصفت في P. M. Brakefield and V. French. *Acta Biotheoretica* 41 (1993): 447-68. تجربة استخدام الانتخاب الاصطناعي لتطوير سلالات من الفراش بأحجام مختلفة للعُيينات مفصلة في A. F. Monteiro. P. M. Brakefield. and V. French. *Evolution* 48 (1994): 1147-57. عرض عام للدراسات الحديثة حول تطور أنماط جناح الفراش موجود في is P. Beldade and P. M. Brakefield. *Nature Reviews Genetics* 3 (2002): 442-52.

للاطلاع على المحاكاة في فراشة النمر الخطافية الذيل انظر in J. M. Scriber. R. H. Hagen. and R. C. Lederhouse. *Evolution* 50

(1996): 222-36. توجد أبحاث علمية كثيرة حول المحاكاة في فراش *الهيليكونيس*، انظر J. Mallet and M. Joron. *Annual Rev. Ecol. Syst*. 30 (1999): 201-33.

9. لوّنه بالأسود

للاستزادة حول أعمال Hugh B. Cott انظر *The Royal Engineers Journal* 52 (1938): 501-17، وأيضًا *Animals: A Zoologist in Africa* (New York: Charles Scribner Sons. 1975).

لنقاش عام حول السفع، انظر M. Majerus. *Melanism: Evolution in Action* (Oxford: Oxford University Press. 1988. فحص دقيق لأحياء السفع الصناعي في العثّ المفلفل قام به N. Grant. *Evolution* 53 (1999): 980-84. and J. Mallet. *Genetics Society News* 50 (2003): 34-38;، وكان الأخير يرد على J. Hopper. *Of Moths and Men: Intrigue. Tragedy. and the Peppered Moth* (New York: Fourth Estate. 2002).

عرضٌ ممتاز للسفع في الثدييات كتبه M. E. N. Majerus and N. I. Mundy. *Trends in Genetics* 19 (2003): 585—88.. المصادر الأولية هي كالتالي: للنمر الأمريكي واليغورندي هو E. Eizirik et al.. *Current Biology* 13 (2003): 448-53; ولطيور البانكويت E. Theron et al.. *Current Biology* 11 (2001): 550-57، ولفأر الجيب الصخري M. Nachman et al.. *Proceedings of the National Academy of Science. USA* 100 (2003): 5268-73، وللدب الكرمودي. K. Ritland et al..

Current Biology 11 (2001): 1468–72. الدراسات الميدانية لفأر الجيب الصخري القاطن صحارى الجنوب الغربي هي L. Dice and P. M. Blossom. *Studies of Mammalian Ecology in Southwestern North American with Special Attention for the Colors of Desert Mammals* (Washington. D.C.: Carnegie Institution of Washington. 1937). pub. no. 485. and L. R. Dice. *Contributions from the Laboratory of Vertebrate Biology* (University of Michigan) 34 (1947): 1–20.

مقال Gould حول الحمر الوحشية موجود في *Hen›s Teeth and Horse›s Toes* (New York: W W. Norton. 1983). pp. 355–65 and 366–75، وتحليل Bard موجود في *Journal of Zoology* (London) 183 (1977): 527–39.

المعادلات العامة للزمن المطلوب لانتشار الطفرات النافعة في مجموعة ما، أو لاحتمال اختفاء الطفرات الضارة من المجموعة موجودة في جميع كتب جينات الجماعات، انظر على سبيل المثال: W.-H. Li. *Molecular Evolution* (Sunderland. Mass.: Sinauer Associates. 1997).

10. عقل جميل: صناعة الإنسان العاقل

تفاعل دارون لمشاهدته سعلاة مذكور في A. Desmond and J. Moore. *Darwin: The Life of a Tormented Evolutionist* (New York: Warner. 1997). اقتبست يوميات الملكة فكتوريا حول جيني من R. A. Keynes. *Annie's Box* (London: Fourth Estate. 2001). اقتبس Erich Fromm من كتابه *Man for Himself* (New York: Rinehart. 1947).

يمكن الاطلاع على مراجعة عامة للتاريخ الجيني والطبيعي لتطوّر الإنسان في J. Klein and N. Takahata. *Where Do We Come From? The Molecular Evidence for Human Descent* (Berlin: Springer-Verlag. 2002).. بعض المواضيع التي تطرقنا إليها قد سبرت في S. B. Carroll. Nature Ml (2003): 849–57.

تاريخ اكتشاف أول نياندرتال مذكور في R. McKie. *Dawn of Man: The Story of Human Evolution* (London: Dorling Kindersley 2000)، وأول تأويلاته المعتبرة فُصِّلتْ في T. H. Huxley. *Evidence as to Man's Place in Nature* (1863). أمّا مراجعة *Athenaeum* لكتاب Huxley ظهرت تاريخ 28 فبراير 1863. وصفت أقدم عينة *H. sapiens* في T. D. White et al.. *Nature* 423 (2003): 742–47.

جُمعت المعلومات المذكورة في الشكلين 3,10 و5,10 من عدة مصادر. استلمتُ آراء مختلفة من علماء أحافير متعدّدين حول عدد أنواع الأناسي المتمايزة وهويتها. اخترت رأياً متحفّظاً لا شاملاً. لاستعراض الآراء المختلفة انظر B. Wood. *Nature* 418 (2002): 133–35. and T. White. *Science* 299 (2003): 1994–96.

لمعلومات إضافية حول آثار أقدام في Laetoli انظر N. Agnew. *Scientific American* 279 (1998): 51–54. معلومات أحافير أحجام الدماغ استخلصت من R. B. Ruff. E. Trinkhaus. and T Holliday. *Nature* 387 (1997): 173–76; G. Conroy et al.. *American Journal of Physical Anthropology* 13 (2000): 111–18; P. Brunet et al.. *Nature* 418 (2002): 145–51; and B. Wood. *Science* 284 (1999): 65–71. J.

Evolving Brains (New York: Scientific American كان .M. Allman Library. 1999) مصدر كثير من معلومات تطوّر الإنسان والرئيسيات وسلوكها، وبنى أدمغتها، والتغيّر المناخي. النمط الفسيفسائي لتطوّر الدماغ وصفه Nature .R. A. Barton and P. Harvey 408 (2000): 1055–58; Nature .W. de Winter and E. Oxnard 409 (2001): 710–411 14a; and D. A. Clark. P. P. Mitra. and S. S. H. Wang. Nature (2001): 189–93.

للاطلاع على الدراسة الأولى لدنا النياندرتال: ..M. Krings et al Cell 90 (1997): 19–30; وأيضًا Public Library of ..D. Serre et al Science/Biology 2 (2004): 0313–0317 .

اقتباس Emerson Pugh مأخوذ من كتابه The Biological Origin of Human Values. (New York: Basic Books, 1977).

الدليل على اللاتناظرات التشريحية في أدمغة القردة الكبار نوقش في Nature .C. Cantalupo and W. D. Hopkins 414 (2001): 505، لكنه عورض بشدة من قبل The Anatomical Record ..Sherwood et al Fart A 271 (2003): 276–85. الدراسات المجراة على مرضى يعانون من انقلاب الموقع situs invertus هي Neurology ..D. Kennedy et al 53 (1999): 1260–65. and S. Tanaka et al.. Neuropsychologia 37 (1999): 869–74.

إنّ حسابات تطوّر متوالية دنا الإنسان مشتقة من المتوالية الكلية لجينوم الإنسان وتوجد معلومات شبيهة عن الشمبانزي، انظر على سبيل المثال Nature .S. B. Carroll 422 (2003): 849–57. المقارنة مع

الفأر مبنية على 420 Mouse Genome Squence Consortium. *Nature* (2002): 520–62، وتحديث قدّمه Dr. Eric Lander. Breckinridge. Colorado. January 2004.

مرجع كلاسيكي حول الاختلافات بين الإنسان والشمبانزي هو M.-C. King and A. C. Wilson. *Science* 188 (1975): 107–16..

أفكار إضافية مبكّرة حول ذات الموضوع كانت E. Zuckerkandl and L. *Pauling in Evolving Genes and Proteins*. ed. V. Bryson and J. H. Vogel. pp. 97–166 (New York: Academic Press. 1965). and R. J. Britten and E. H. Davidson. *Quarterly Review of Biology* 46 (1971): 111–38

ارتباط تحول جين الميوسين بتقلص عضلات فك الإنسان جاء في by H. Stedman et al.. *Nature* 428 (2004): 415–18.

اكتشاف جين FOXP2 المرتبط باضطراب في المقدرة على اللغة والكلام موجود في C. S. L. Lai et al.. *Nature* 413 (2001): 519–23، وتصوير المرضى المصابين بهذا بالخلل وصف في E Liégeois et al.. *Nature Neuroscience* 6 (2003): 1230–36;، والتطوّر الجزيئي لمتوالية FOXP2 رصد في W. Enard et al. *Nature* 418 (2002): 869–872، ونشاط FOXP2 في دماغ الإنسان موجود في C. S. Lai et al.. *Brain* 126 (2003): 2455–62، ونشاط FOXP2 في أدمغة الفئران والجرذان وُصف في K. Takahashi et al.. *Journal of Neuroscience Research* 73 (2003): 61–72. and R. J. Ferland et al.. *Journal of Comprehensive Neurology* 460 (2003): 266—79.

للاستزادة حول الجينات والخبرة والسلوك البشري انظر M. Ridley. *Nature via Nurture: Genes. Experience. and What Makes Us Human* (New York: HarperCollins. 2003).

11. أشكال لانهائية غاية في الجمال

النسخ الأولى من مقاطع *The Origin of Species* توجد في *The Foundations of the Origin of Species: Two Essays Written in 1842 and 1844 by Charles Darwin*. ed. Francis Darwin (Cambridge: Cambridge University Press. 1909).

لوجهة نظر أخرى حيال إمكانية تكرار التطوّر ذاته في مستويات متعدّدة، انظر Simon Conway Morris. *Life's Solution: Inevitable Humans in a Lonely Universe* (Cambridge: Cambridge University Press. 2003).

أخذت معطيات فهم المجتمع للتطوّر من G. Bishop. *The Public Perspective* 9 (1998): 39–44. توجد معلومات إضافية حول وضع تدريس التطور في موقع National Center for Science Education (www.natcenscied.org).

توجد معلومات مفصّلة حول التغيّرات المتعدّدة في طبعات *The Origin of Species* يمكن العثور عليها في *The Origin of Species by Charles Darwin: A Variorum Text* (Philadelphia: University of Pennsylvania Press. 1959). بيان Pope John Paul II حول التطور والردود عليه نوقشت في E. C. Scott. *The Quarterly Review of*

Biology 72 (1997): 401–6. ظهر تعليق Charles Harper في *Nature* 411 (2001): 239–40. آراء Scott Gilbert حول تعليم التطور من خلال جينات النموّ ونقده لكتاب M. Behe. *Darwin's Black Box: The Biochemical Challenge to Evolution* (New York: Free Press. 1996) ظهر في *Nature Reviews Genetics* 4 (2003): 735–41.

أحاديث ثورو حول المدى البعيد موجودة في كتابه الصادر 1849 *A Week on the Concord and Merrimack Rivers*. آراء John F. Haught مأخوذة من *Science and Religion: From Conflict to Conversation* (New York: Paulist Press. 1995). مقتطفات من كتاباته توجد على العنوان: / www.aaas.org /spp /dser / evolution /perspectives / haught.shtml.

إحصائيات نموّ عدد السكان وتاريخه مأخوذة من مكتب المراجع السكّانية (Population Reference Bureau (www.prb.org).

تاريخ النمر التسماني thylacine سرد في D. Owen. *Thylacine: The Tragic Tale of the Tasmanian Tiger* (Crows Nest. NSW: Allen and Unwin. 2003). توجد معلومات إضافية حول انقراض الأنواع في E. O. Wilson and F. M. Peter. eds.. *Biodiversity* (Washington. D.C.: National Academy Press. 1988). and E. O. Wilson. *The Diversity of Life* (New York: Penguin. 1992).

خطاب Huxley أمام المعهد الملكي Royal Institution في فبراير 1860 مقتبس في A. Desmond and J. Moore. *Darwin: The Life of a Tormented Evolutionist* (New York: Warner. 1991). p. 489.

شكر وتقدير

هذا الكتاب نتاج شغف، أتمنى أن يكون هذا حال كل مؤلِّف. غير أنّني بكل تأكيد كنت أكثر حظاً من الكثيرين لأن أفعالي تحققت واستنارت كثيراً بمساعدة زوجتي جيمي كارول. فحسها النقدي وتشجيعها منح الكتاب ولادته، وعملها الدؤوب وموهبتها الفنية غذَت نمو الكتاب، وصبرها دفعها لتحمل أسئلتي العديدة من قبيل «عزيزتي، ما رأيك بهذا الاقتباس\الفقرة\الجزء\الفصل\العنوان\الصورة\.. إلخ؟»، وأجوبتها الصادقة قد جنّبت القرّاء الكثير من التشويش والمعاناة. لا يحلم المرء بزوج أكثر كرماً، وبيت أدفأ للإنتاج، أو حسّ فكاهة أفضل لتجاوز التقلّبات والمنعطفات الحتمية.

إنّ البحث الذي سبق إعداد الكتاب وتحبيره تمّ بمساعدة عائلتي الرائعة التي خاضت بسعادة عديداً من الأدغال والمستنقعات والأنهار الموحلة، وزارت متاحف لا تعدّ ولا تحصى حباً بالتاريخ الطبيعي. ساعدني ابناي وِل وباتريك في العثور على الأحافير ودلّاني على حيوانات مهمة في المتاحف. وقام ربيبي جوش كليس بصناعة عدد من الرسومات المهمة.

أشكرُ أختي نانسي التي درستُ وتناقشتُ معها حيوات داروِن وهكسلي ولايل ومعاصريهم ما يقارب عقداً كاملاً. أشكرُ كذلك أخي بيتر الذي دفعني دائماً لرؤية الصورة الكبرى ولنقاشاتنا العديدة حول تطوّر الإنسان. وأشكر أيضًا أخي جِم لتشجيعه الكبير.

شكراً لوَالديّ جوان كارول والمرحوم جي. روبرت كارول على زرعهما في أبنائهما الاعتناء بالهوايات وما يثير الاهتمام، حتى لو كان ذلك تربية الأفاعي في المنزل.

كانت الرسومات والأشكال مهمة كبيرة. قام جيمي وجوش وليان أولدز بإنتاج الرسومات والأشكال الأولية، وقامت ليان أولدز بإعادة رسم معظم الأشكال التي استخدمت من مصادر أخرى. جمع ستيف بادوك Steve Paddock، وهو عضو قديم في فريقي البحثي، الأشكال الملونة ونضّدها. إنّني ممتن للمجهود الذي بذله هؤلاء في كل صورة، وسعيدٌ بالنتيجة.

ساهم زملاء من دول العالم بكثير من الصور والأشكال التي كانت ثمرة حقلهم التخصصي وأبحاثهم المختبرية. وصوّر ألبرت آينشتاين ذلك حينما قال:

«أذكِّر نفسي كل يوم مئات المرات بأن وجداني وحياتي الخارجية قائمان على أعمال العديد من البشر، أحياء وأموات، ويجب أن أبذل قصارى جهدي لأعطي بحجم ما أخذت وما أزال آخذُ».

- العالم كما أراه،

أفكار وآراء (1954)

ترجمة سونيا بارجمان

إنّني مدين وممتن لمجتمع أكبر وأكثر تنوّعاً مما كان عليه أيام آينشتاين. لقد كنتُ محظوظاً لأحبّر هذا الكتاب بفضل الجهود الفردية والجمعية لمجتمع ضخم من علماء الأحياء بما في ذلك علماء الأحافير والجينات والأجنّة والتطوّر. وبينما سبق بعض العلماء العظام عصري، إلاّ أن

أغلب الاكتشافات التي تناولها الكتاب قام بها الجيل الحالي. أشكرُ زملائي العديدين الذين زوّدوني بأشكال لهذا الكتاب، والذين شاركوني خبراتهم وأفكارهم لسنوات.

إنّها مهنة عظيمة ورائعة قدّرت لي الالتقاء في كل مكان بأناس موهوبين وشغوفين متحلّين بأخلاقيات عمل تندر في معظم المهن. وأشعر بامتنان خاص للأفراد الذين عملوا وتعاونوا معي خلال العشرين سنة الماضية. إنّ إبداع ومثابرة تلامذتي والقائمين بأبحاث الزمالة الأكاديمية والفنيين هو وراء النجاح الذي حققه مختبري، ولقد تعلمتُ منهم أكثر بكثير مما تعلموه مني. تمتعت بحرية عظيمة غير معهودة في اختيار مواضيع البحث، الشكر للدعم المالي السخي من معهد هاوارد هيوز الطبي ومؤسسة العلوم الوطنية National Science Foundation، وبرنامج علماء شو Shaw Scholars من مؤسسة ملواكي Milwaukee Foundation.

كان لي العديد من المرشدين الاستثنائيين الذين منحوني الحرية والتشجيع في السنوات السابقة التي حفزت نمويّ كعالم، وزرعوا واعتنوا ببذور أزهرت هنا. أشكرُ سايمون سيلفر Simon Silver وأوين سيكتون Owen Sexton وجيمس جونز James Jones (جميعهم في جامعة واشنطن في سانت لويس)، وكذلك د. وليام ديولف William DeWolfe (مستشفى شمّاسة بيث إسرائيل Beth Israel Deaconess Hospital)، ود. بي. ديفد ستولار B. David Stollar (مشرفي في أثناء الدكتوراه)، وكارلوس سوننشاين Carlos Sonnenschein وأنّا سوتو Ana Soto (جميعهم في جامعة تفتس Tufts University)، ود. ماثيو سكوت

Matthew Scott (مشرفي في أثناء أبحاث الزمالة الأكاديمية، والموجود حالياً في جامعة ستانفورد) على الفرص الاستثنائية التي منحوني إياها والحكمة التي أنارتني.

أشكرُ أخيراً مشرفِيَّ الجديديْن في عالم النشر اللذين من دونهما ما نشأ هذا العمل ولا تطوّر. وكيلي روس جالن Russ Galen (رجل الأربع دقائق) الذي منحني نصائحه القيمة ونقده الكيّس وتشجيعه الكبير. ومحرر أعمالي جاك ريبشك Jack Repcheck الذي دفع بهذا المشروع عبر حماسه الكبير للإيفوديفو وقناعته بأنه قصة تستحق السرد، ومساعدتي كذلك خلال عملية الكتابة.

المفاهيم والمصطلحات العلمية

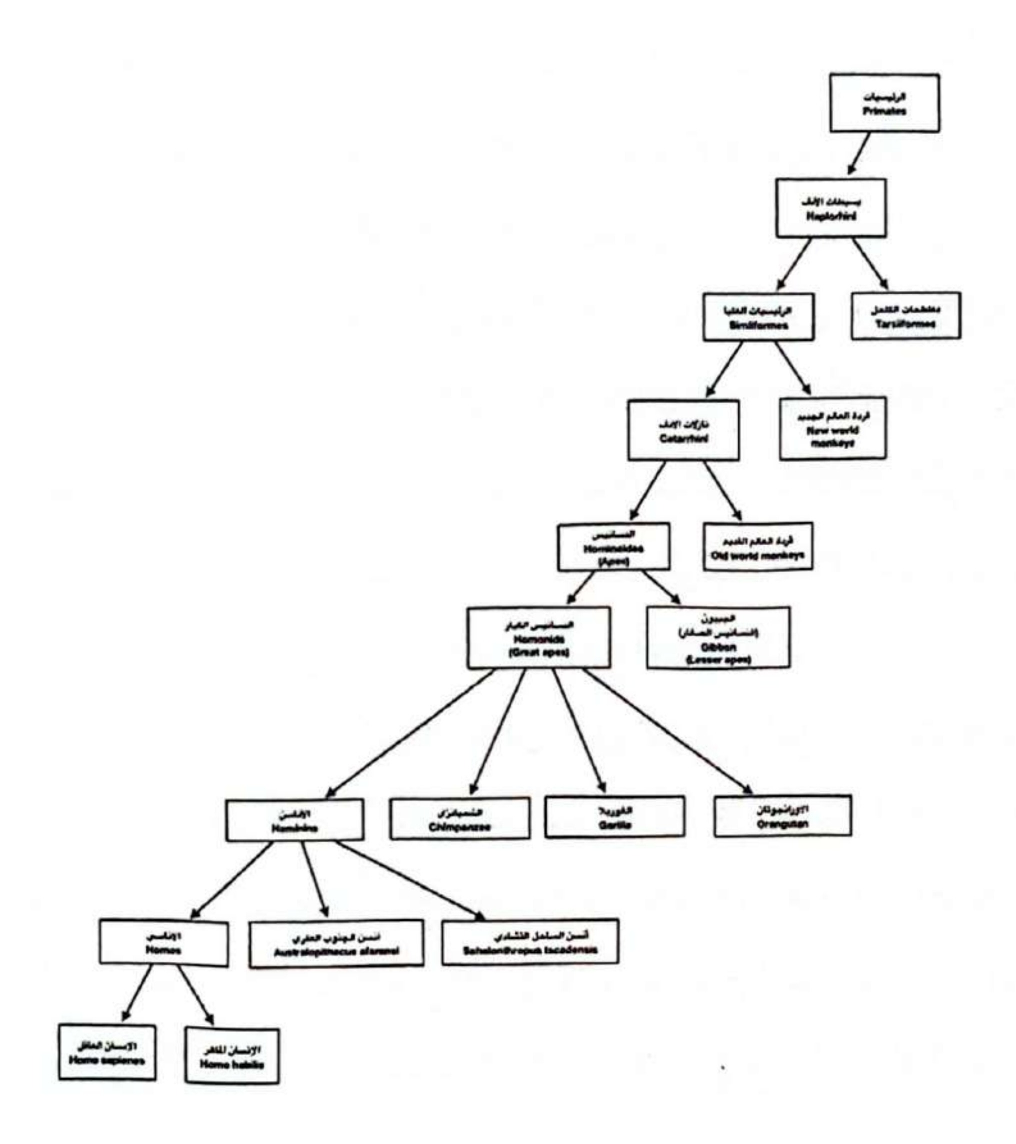
يُعنى التصنيف الأحيائي (biological classification) للكائنات الحية بتوضيح علاقات الكائنات الحية بعضها ببعض مستنداً إلى أدوات شتى. يضم التصنيف درجات متعدّدة، نورد هنا أهمها (مرتبة تنازلياً، من الأعم إلى الأخص): المملكة (kingdom) وتضم الممالك التالية: الحيوانات والنباتات والفطريات والطلائعيات وبدائيات النوى، ثم الشعبة (Phylum)، ثم الطائفة (Class)، ثم الرتبة (Order)، ثم الفصيلة (Family)، ثم الجنس (Genus)، ثم النوع (Species).

النوع هو مجموعة الأفراد القادرة على التزاوج فيما بينها منتجة ذرية غير عقيمة، غير أن هذا التعريف ليس عاماً. على سبيل المثال يُصنف كل من الأسد والنمر كأنواع منفصلة من فصيلة السنوريات (Felidae) إلاّ أنهما ينجبان الأسد الببري (Liger) وهو نتاج أسد ذكر ونمر أنثى. ويستطيع الأسد الببري إنجاب ذرية بعد التزاوج مع الأسد أو النمر على حد سواء.

يضم الاسم العلمي للكائن الحي اسم الجنس واسم النوع، ويكتبان بخط مائل، فعلى سبيل المثال يوجد *الإنسان* (الجنس) *العاقل* (النوع)، وذبابة الفاكهة *دروسوفيلا* (الجنس) *ميلانوغاستر* (النوع).

الرسم أدناه يقدم فكرة عامة عن موقع الإنسان في التصنيف الأحيائي، ويحدد الفرق بين القردة والنسانيس والبشر، وقد تجنبنا

التفاصيل والأسماء العلمية بُغية وضوح الفكرة المطروحة في الفصل العاشر حول تطور الإنسان.



أولاً: مفاهيم ومصطلحات أحيائية:	
activator	مفعّل
adaptation	تكيّف
analogical resemblance	**التشابه التناظري**
anatomical asymmetry	**لاتناظر تشريحي**
animal model	نموذج حيواني
anterior	أمام
antibody	جسم مضاد
appendage	زائدة
asymmetry	لاتناظر
autopod	قدم مستقلة
basal cell carcinoma	سرطانة الخلايا القاعدية
batesian mimicry	**محاكاة بيتس**
bilateral symmetry	تناظر الجانبين
bipedalism	ثنائية القدم
biramous	طرف ثنائي التفرّع
blastopore	مسمّ الأريمة
blastula	أرَيْمة
bone morphogenetic proteins (bmp)	بروتينات تشكّل العظم
book lungs	رئات كتابية
braincase	قِحْف
bristles	هُلب (مفردها هلبة)
Cambrian period	العصر الكامبري

cell differentiation	تمايز الخلايا
cell migration	هجرة الخلية
cerebral cortex	القشرة المخية
change	تغير
chronospecies	نوع زمني
chrysalis stage	مرحلة الخادرة
combinations	توافقيات
combinatorial logic	المنطق التوافقي
common ancestor	سلف مشترك
comparative genomics	علم الجينومات المقارن
comparative neuroanatomy	علم التشريح العصبي المقارن
concentration gradients	تراكيز متدرجة
contours	كفاف، الخطوط الكفافية
cortex cerebral	قشرة مخية
creationists	دعاة الخلق
development	نموّ
developmental biology	علم النموّ
digits	أصابع
DNA binding protein	**بروتين لفيف الدنا**
domain	نطاق
dorsal	ظهري، نسبة للظهر
ectoderm	الأديم الظاهر
embryo	جنين
embryology	علم الأجنّة

endoderm	الأديم الباطن
epidermis	بشرة
EvoDevo. Evolutionary Development	إيفو ديفو
evolution	تطوّر
evolutionary transition	**الانتقال التطوري**
fate maps	خرائط المصير
fertilization	إخصاب
fetal alcohol syndrome	متلازمة الجنين الكحولي
fitness	لياقة
form	شكل
frontal lobe	الفص الجبهي (الأمامي)
gastrulation	**تكوّن المُعيدة**
gene cloning	استنساخ الجينات
gene expression	نشاط جيني
gene frequencies	التواترات الجينية
genetic code	الشفرة الوراثية
genetic regulatory networks	**شبكات تحكم جيني**
genetic switch	**مفتاح جيني**
genetics	علم الجينات
genome	جينوم
gestation time	فترة الحمل
heredity	وراثة
holoprosencephaly	اندماج مقدم الدماغ
homeodomain	**نطاق نحتي**

homeotic	**نحتي**
homeotic genes	**جينات ناحتة**
homeotic mutant	**طافرة نحتية**
homologous genes	جينات متناددة
irreducible complexity	تعقيد غير قابل للاختزال
junk DNA	دنا غير مشفّر
language	لغة
lateral inhibition	**التثبيط الجانبي**
limbic lobe	الفص الحُوفي
lobopod	طرف فصي
local wiring circuit	**دارات التوصيلات المحلية**
longevity	**تعمير**
macroevolution	**تطوّر كلي**
master genes	**جينات حاكمة**
masticatory structure	**البنى الماضغة**
maxillipeds	**أقدام فكّية**
melanism	**سفع**
melanoblasts	الأرومات الميلانينية
melanocytes	الخلايا الميلانينية
mesoderm	الأديم الأوسط
messenger RNA	الرنا المرسال
microevolution	**تطوّر جزئي**
model organism	نموذج دراسي
modern synthesis	النظرية التركيبية الحديثة

modular architecture	**المعمار المدْولي**
module	**مدول**
molecular biology	علم الأحياء الجزيئية
morphogenesis	التشكل، تشكل الأنماط
morphologies	مورفولوجيا
multifunctionality	التعدّد الوظيفي
musculature	الجهاز العضلي
mutation	طفرة
natural selection	انتخاب طبيعي
neocortex	قشرة حديثة
nerve cord	الحبل العصبي
neural circuitry	**دارات عصبونية**
neural crest	عرف عصبي
neural tube	الأنبوب العصبي
niche	بيئة ملائمة
notochord	الحبل الظهري
occipital lobe	الفص القذالي (القفوي)
organism	المتعضّي
organization	التعضية
organizer	**المعضّي**
palaeontologist	عالم أحافير
paleoanthropology	**علم الأناسة الأحفورية**
paleontology	علم الأحافير
parallel evolution	تطوّر متوازٍ

parietal lobe	الفص الجداري
pattern	نمط
pedipalp	أجزاء الفم
pentaradial	خماسي شعاعي
permutation	تبديل
phylum	شعبة
pigment cells	خلايا صباغية
pigmentation	اصطباغ
pleistocene	العصر البليستوسيني
pleopods	**أقدام شراعية**
polarity	القطبية
polydactyly	عَنَش (كثرة الأصابع)
population genetics	علم جينات الجماعات
positive selection	**انتخاب إيجابي**
posterior	خلف
predation pressure	ضغط افتراسي
premotor area	الباحة أمام القشرة الحركية
primatologist	عالم رئيسيات
programmed cell death	موت الخلايا المبرمج
punctuated equilibria	**التوازنات المتقطعة**
pupa	خادرة
radial symmetry	تناظر شعاعي
reductionism	الاختزالية
redundancy	**الحشو**

regulatory DNA	**دنا تنظيمي**
repressor	**كاظم**
rhombomeres	**قُسيمات معيّنية**
right-handedness	**أيمنية**
scale	حرشفة
selection coefficient	**معامل الانتخاب**
selective advantage	**ميزة انتخابية**
selective disadvantage	**عيب انتخابي**
selective sweep	**الكنْس الانتخابي**
self-awareness	الوعي بالذات
sensory bristle	**هلب الاستشعار**
sequencing	**تحديد المتواليات**
serial homology	التنادد التسلسلي
sexual selection	الانتخاب الجنسي
shape	مظهر
signaling pathways	مسارات تأشيرية
signature sequence	**متوالية توقيعية**
silent substitution	**استبدال صامت**
situs inversus	**انقلاب الموقع**
somites	جسيدة، جسيدات
speciation	**تناوع**
species	نوع، أنواع
specificity	تخصصية
speech	الكلام

spinneret	مغزل، مغازل
structure	بنية
swimmeret	أطراف السباحة
symmetry	تناظر
synpolydactyly	**عَنَش ملتحم**
systematics	علم تصنيف الأحياء
tadpole	شرغوف
taxon. taxa	أصنوفة، أصنوفات
temporal lobe	الفص الصدغي
temporalis	العضلة الصدغية
tentacles	مجسات
tool kit	عدّة أدوات
trait	صفة
transcription	عملية النسخ
transcription factors	عوامل النسخ
translation	الترجمة
transplanting	ازدراع
trilobite	ثلاثي الفصوص
tubular tracheae	قصبة هوائية إنبوبية
turn off gene	إطفاء جين (إيقاف)
turn on gene	تنشيط جين (تشغيل)
universal process	عملية عامة
upright posture	انتصاب القامة
variation	تفاوت

vascular system	الجهاز الوعائي
ventral premotor area	**الباحة أمام القشرة الحركية البطنية**
visualisation	التمثيل البصري
Wernicke area	باحة فيرنكه
zone of polirizing activity (ZPA)	**منطقة النشاط الاستقطابي (منشط)**

ثانياً: أسماء جينات وبروتينات

aniridia	**جين المقزح**
apterous	**بروتين عديم الأجنحة**
distal-less	**جين انعدام الأطراف القاصية**
eyeless	**جين عديم العين**
FOXP2 protein	بروتين فوكس بي2
homeobox	**صندوق النحت**
Hox genes	**جينات Hox**
hox zones	مناطق Hox
lac repressor	كاظم لاكتوزي
melanocortin- 1 receptor (mc1r)	مستقبل ميلانوكورتين–1 أو
myosin heavy chain 16. myh16	سلسلة الميوسين الثقيلة **16**،
nubbin	**بروتين النتوء**
pair-rule genes	**جينات القاعدة الزوجية**
pax-6	**جين باكس 6**
small eye	***جين العين الصغيرة***
tinman	**جين الرجل الصفيح**

ثالثاً: أسماء أنواع وأصنوفات	
أكانثوستيجا	acanthostega
برمائيات	amphibians
حلقيات	annelids
نسّان	**ape. hominoid**
عنكبوتيات	arachnids
بدئيات	archeabacteria
مفصليات الأرجل	arthropods
أنسن الجنوب الأفريقي	***Australopithecus africanus***
أنسن الجنوب العفري	***Australopithecus afarensi***
العاثيات	bacteriophage
فراشة الكرمة الأنبوبية الخطافية الذيل	***Battus philenor***
ثنائي الجانب	bilateral
أفعى الأصلة	boas
يساريع	caterpillars
حبليات الرأس	cephalochordates
حوتيات	cetaceans
كُلّابيات	chelicerates
حبليات	chordates
مذرق	cloaca
لاسعات	cnidarians
مجوّفات الأشواك	coelacanth
مشطيات	comb jellies
قشريات	crustaceans

deuterostomes	ثانويات الفم
dragonfly	يعسوب
Drosophila melanogaster	ذبابة الفاكهة
echinoderms	شوكيات الجلد
Ediacaran fauna	حيوانات إدياكاران
fungi	فطريات
hagfish	سمك الجريث
hominids. great apes	**النسّانون الكبار**
hominin. hominins	**أنسن، أناسن**
homo	**إنسان، إناسي**
Homo habili	الإنسان الماهر
jawless fish	السمك عديم الفكين
lampreys	جلكيات
lancelet	رُميح
lichens	أشنيات
lizards	عضايات
lobopodians	فصّيات الأقدام
manatees	خراف البحر
marsupial	حيوان جرابي
mayflies	ذباب نوار
millipede	ألفيات الأرجل
mollusks	رخويات
mysids	مايسدات
nematode worms	ديدان اسطوانية

onychophora	حاملات المخالب (أو الديدان المخملية)
orangutan	سعلاة
primates	رئيسيات
protists	طلائعيات
protostomes	أوليات الفم
pterosaurs	تيروصورات
python	أفعى البايثون
reptiles	زواحف
Sahelonthropus tscadensis	**أُنسن الساحل التشادي**
sauripteris	سوربترس
sea anemones	شقائق البحر
sea urchin	قنديل البحر
sponges	إسفنجيات
tetrapods	رباعيات الأقدام
three spine stickleback	سمكة أبي شوكة ثلاثية الأشواك
Tiger Swalllowtail	**فراشة النمر الخطافية الذيل**
tulerpeton	تولربيتون
tunicates	ردائيات
urbilateria	ثنائي الجانب البدائي
woolly mammoth	ماموث صوفي
zebra fish	سمكة الزرد

أشكال لانهائية غاية في الجمال

«يجعلُ علم الإيفوديفو «الأشكال اللانهائية» متاحةً لقراء أكثر. وقد أدّى كارول ذلك ببراعة»

Guardian

الأحصنة المخطّطة، والثدييات الرمادية العملاقة التي يبلغ طول أنف كل منها 6 أقدام، والقطط الرقطاء التي تجري أسرع من سيارة الجيب. لو لم توجد هذه الكائنات، لاستحال تصديق وجودها أصلاً.

كوكبنا مليء بالعديد من الغرائب المدهشة وأشكال الحيوانات الجميلة. رغم كل التقدم المعرفي الذي أحرزه «داروين» ورواد آخرون في حقول علمية عديدة، إلا أنّ كيفية تكوّن هذه الأشكال ظلّ سراً غامضاً. ندين بالشكر لعلم النمو التطوري «الإيفوديفو»، لأننا نفهم هذه العملية الآن. لقد ظهر أنّ الإجابة تكمن في عُدّة الأدوات الجينية الغابرة التي تتشاركها جميع الأنواع.

يأخذنا شون كارول في رحلة مثيرة في هذا العلم الرائد، ويرينا كيف أنّ جميع الأشكال، من ذبابة الفاكهة البسيطة إلى الإنسان العاقل، هي نتيجة لتعلم الجينات القديمة حيلاً جديدة.

السعر 90 درهماً








9 789948 175681